

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 許出願公開番号

特開2002-311464

(P2002-311464A)

(43) 公開日 平成14年10月23日 (2002. 10. 23)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テームコード <sup>*</sup> (参考)
G 0 2 F 1/35	5 0 1	G 0 2 F 1/35	5 0 1 2 K 0 0 2
1/355	5 0 1	1/355	5 0 1 5 F 0 7 2
H 0 1 S 3/06		H 0 1 S 3/06	B 5 K 0 0 2
3/10		3/10	Z
3/23		3/23	

審査請求 未請求 請求項の数20 O L (全 26 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2002-26007(P2002-26007)

(22) 出願日 平成14年2月1日 (2002. 2. 1)

(31) 優先権主張番号 特願2001-27273(P2001-27273)

(32) 優先日 平成13年2月2日 (2001. 2. 2)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

(72) 発明者 増田 浩次

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日

本電信電話株式会社内

(72) 発明者 森 淳

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日

本電信電話株式会社内

(74) 代理人 100077481

弁理士 谷 義一 (外1名)

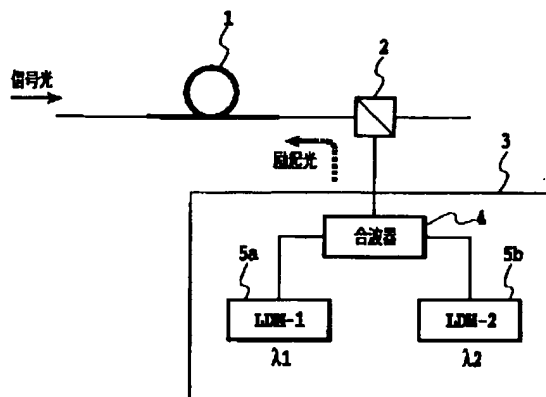
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ファイバ増幅器及びそれを用いた光通信システム

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 平坦かつ広帯域の利得スペクトルを有する光ファイバ増幅器および光通信システムの提供。

【解決手段】 互いに異なる波長の励起光を発する2つのレーザ光源5a、5bと、それら2つのレーザ光源からの励起光によって励起されるテルライトファイバ1とを有し、それら2つのレーザ光源からの励起光の波数の差の絶対値が $125 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする光ファイバ増幅器。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 互いに異なる波長の励起光を発する2つのレーザ光源と、

前記2つのレーザ光源からの励起光によって励起されるテルライトファイバとを有し、および前記2つのレーザ光源からの励起光の波数の差の絶対値が $125\sim290\text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項2】 互いに異なる波長の励起光を発する2つのレーザ光源と、

該2つのレーザ光源からの励起光により励起される第1および第2のテルライトファイバと、を有し、および前記2つのレーザ光源からの励起光の波数の差の絶対値が $125\sim290\text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項3】 互いに異なる波長を有する励起光を発する第1および第2のレーザ光源と、

前記第1のレーザ光源からの励起光により励起されるテルライトファイバと、

前記第2のレーザ光源からの励起光により励起されるシリカファイバとを有し、および前記第2のレーザ光源からの励起光と前記第1のレーザ光源からの励起光との波数の差が $42\sim166\text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項4】 前記第1のレーザ光源からの励起光と前記第2のレーザ光源からの励起光とを合波する合波器をさらに有することを特徴とする請求項3に記載の光ファイバ増幅器。

【請求項5】 前記テルライトファイバと前記シリカファイバとが直列に接続され、

前記テルライトファイバが信号光の入射方向に対して前段に設置され、および前記テルライトファイバとシリカファイバの間に、前記第1のレーザ光源からの励起光を反射する反射素子を有することを特徴とする請求項4に記載の光ファイバ増幅器。

【請求項6】 複数のテルライトファイバと、複数のシリカファイバと互いに異なる波長を有する励起光を発する2つのレーザ光源と、を有し、それらのテルライトファイバとシリカファイバが互いに隣接するように直列配置され、および前記2つのレーザ光源からの励起光の波数の差の絶対値が $42\sim166\text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項7】 互いに異なる波長を有する励起光を発する第1、第2および第3のレーザ光源と、

前記第1レーザ光源で励起されるテルライトファイバと、

前記第2および第3のレーザ光源で励起されるシリカファイバとを有し、

前記第2レーザ光源の励起光の波数と、前記第1レーザ光源の励起光の波数との差が $42\sim166\text{ cm}^{-1}$ であり、および前記第1レーザ光源の励起光の波数と、前記

第3レーザ光源の励起光との波数との差が $42\sim294\text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項8】 互いに異なる波長を有する励起光を発する第1、第2および第3のレーザ光源と、

前記第1および第2のレーザ光源で励起されるテルライトファイバと前記第3のレーザ光源で励起されるシリカファイバと、を有し、

前記第3レーザ光源の励起光の波数と、前記第1レーザ光源の励起光の波数との差が $42\sim166\text{ cm}^{-1}$ であり、

および前記第1レーザ光源の励起光の波数と、前記第2レーザ光源の励起光との波数の差が $125\sim290\text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項9】 互いに異なる波長を有する励起光を発する第1、第2、第3および第4のレーザ光源と、

前記第1および第2のレーザ光源で励起されるテルライトファイバと前記第3および第4のレーザ光源で励起されるシリカファイバと、を有し、

前記第3レーザ光源の励起光の波数と、前記第1レーザ光源の励起光の波数との差が $42\sim166\text{ cm}^{-1}$ であり、

前記第1レーザ光源の励起光の波数と、前記第2レーザ光源の励起光の波数との差が $125\sim290\text{ cm}^{-1}$ であり、

および前記第1レーザ光源の励起光の波数と、前記第4レーザ光源の励起光の波数との差が $42\sim290\text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項10】 互いに異なる波長を有する励起光を発する第1、第2、第3および第4のレーザ光源と、

第5および第6のレーザ光源と、

前記第1および第2のレーザ光源で励起される第1のテルライトファイバと前記第5および第6のレーザ光源で励起される第2のテルライトファイバと、

前記第3および第4のレーザ光源で励起されるシリカファイバと、を有し、

前記第3レーザ光源の励起光の波数と、前記第1レーザ光源の励起光の波数との差が $42\sim166\text{ cm}^{-1}$ であり、

前記第1レーザ光源の励起光の波数と、前記第2レーザ光源の励起光との波数の差が $125\sim290\text{ cm}^{-1}$ であり、

および前記第1レーザ光源の励起光の波数と、前記第4レーザ光源の励起光との波数の差が $42\sim290\text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項11】 前記第3レーザ光源の励起光の波数と、前記第5レーザ光源の励起光の波数との差が $42\sim166\text{ cm}^{-1}$ であり、

前記第5レーザ光源の励起光の波数と、前記第6レーザ光源の励起光との波数の差が $125\sim290\text{ cm}^{-1}$ であり、

および前記第5レーザ光源の励起光の波数と、前記第4レーザ光源の励起光との波数の差が $42\sim290\text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする請求項10に記載の光ファイバ増幅器。

【請求項12】 前記第3レーザ光源の励起光の波数と、前記第5レーザ光源の励起光の波数との差が $42\sim166\text{ cm}^{-1}$ であり、

前記第5レーザ光源の励起光の波数と、前記第6レーザ光源の励起光との波数の差が $125\sim290\text{ cm}^{-1}$ であり、

および前記第5レーザ光源の励起光の波数と、前記第4レーザ光源の励起光との波数の差が $42\sim290\text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする請求項10に記載の光ファイバ増幅器。

【請求項13】 前記第3レーザ光源の励起光の波数と、前記第5レーザ光源の励起光の波数との差が $42\sim166\text{ cm}^{-1}$ であり、

前記第5レーザ光源の励起光の波数と、前記第6レーザ光源の励起光との波数の差が $125\sim290\text{ cm}^{-1}$ であり、

および前記第5レーザ光源の励起光の波数と、前記第4レーザ光源の励起光との波数の差が $42\sim290\text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする請求項10に記載の光ファイバ増幅器。

【請求項12】 互いに異なる波長を有する励起光を発する第1および第2のレーザ光源と、テルライトファイバと、エルビウム添加ファイバとを有し、前記第1のレーザ光源からの励起光の波長が1410～1440nmであり、および前記第2のレーザ光源からの励起光の波長が1450～1500nmであることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項13】 第1および第2のレーザ光源と、前記第1のレーザ光源からの励起光により励起されるテルライトファイバと、前記テルライトファイバで増幅された信号光を、第1および第2の波長域の信号光に分離する波長選択的分波器と、前記第2のレーザ光源からの励起光により励起され、第1波長域の信号光を増幅するツリウム添加ファイバと、前記ツリウム添加ファイバで増幅された第1波長域の信号光と、第2波長域の信号光とを合波する合波器とを有し、および前記第1のレーザ光源の励起光波長が1310～1480nmであることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項14】 第3のレーザ光源と、前記第3のレーザ光源からの励起光により励起されるシリカファイバとをさらに有し、前記第3のレーザ光源の励起光波長が1380～1550nmであり、および前記第2波長域の信号光を前記シリカファイバにより増幅することを特徴とする請求項13に記載の光ファイバ増幅器。

【請求項15】 第1～第3のレーザ光源と、前記第1のレーザ光源からの励起光により励起されるテルライトファイバと、前記第2のレーザ光源からの励起光により励起されるツリウム添加ファイバと、前記第3のレーザ光源からの励起光により励起されるシリカファイバとを有し、前記テルライトファイバと、前記ツリウム添加ファイバと、前記シリカファイバとが、この順に直列に接続され、前記第1のレーザ光源からの励起光が1310～1480nmの波長を有し、および前記第3のレーザ光源からの励起光が1380～1550nmの波長を有することを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項16】 第1のレーザ光源と前記第1のレーザ光源からの励起光により励起されるエルビウム添加テルライトファイバと、を有し、および前記第1のレーザ光源からの励起光の波長が1410～1440nmであることを特徴とする光ファイバ増幅器。

【請求項17】 前記エルビウム添加テルライトファイバを励起するための第2のレーザ光源をさらに有し、および前記第2のレーザ光源からの励起光の波長が1450～1500nmであることを特徴とする請求項16に

記載の光ファイバ増幅器。

【請求項18】 (a) 第1および第2のレーザ光源、および前記第1のレーザ光源からの励起光により励起されるテルライトファイバを有する中継器と、(b) 前記第2のレーザ光源からの励起光により励起されるシリカファイバからなる1区間の伝送線路とを含む伝送線路区間を、少なくとも1区間以上有し、および前記第2のレーザ光源からの励起光の波数と前記第1のレーザ光源からの励起光の波数との差が $42 \sim 166 \text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする光通信システム。

【請求項19】 (a) 第1～第3、第5および第6のレーザ光源と、前記第1および第2のレーザ光源からの励起光により励起される第1のテルライトファイバと、前記第3のレーザ光源からの励起光により励起される第1のシリカファイバと、前記第5および第6のレーザ光源からの励起光により励起される第2のテルライトファイバとを有する中継器と、(b) 第4のレーザ光源と、前記第4のレーザ光源からの励起光により励起される第2のシリカファイバとを有する1区間の伝送線路とを含む伝送線路区間を、少なくとも1区間以上有し、前記第1～第4のレーザ光源は互いに異なる波長を有する励起光を発し、前記第3レーザ光源の励起光の波数と、前記第1レーザ光源の励起光の波数との差が $42 \sim 166 \text{ cm}^{-1}$ であり、前記第1レーザ光源の励起光の波数と、前記第2レーザ光源の励起光との波数の差が $125 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$ であり、および前記第1レーザ光源の励起光の波数と、前記第4レーザ光源の励起光との波数の差が $42 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする光通信システム。

【請求項20】 前記第3レーザ光源の励起光の波数と、前記第5レーザ光源の励起光の波数との差が $42 \sim 166 \text{ cm}^{-1}$ であり、前記第5レーザ光源の励起光の波数と、前記第6レーザ光源の励起光との波数の差が $125 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$ であり、および前記第5レーザ光源の励起光の波数と、前記第4レーザ光源の励起光との波数の差が $42 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$ であることを特徴とする請求項19に記載の光通信システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光ファイバ増幅器及びそれを用いた光通信システムに関する。

【0002】

【従来の技術】光通信システムにおける通信容量の大容量化が、近年益々重要な課題になってきている。通信容量の大容量化のアプローチの1つとして、波長分割多重化された光ファイバ通信システム(WDMシステム)がある。このWDMシステムの大容量化および多チャネル

ル化のためには、より広い波長帯域において平滑な利得特性を有する増幅器が必要であり、将来的に100nm以上の帯域幅が必要になるであろうと予測されている。

【0003】従来、光ファイバ通信システム用の増幅器としては、エルビウム添加ファイバ増幅器(EDFA)、トリウム添加ファイバ増幅器(TDFA)および、プラセオジム添加ファイバ増幅器(PDFA)などの、希土類添加ファイバ増幅器が用いられてきている。しかしながら、これらの希土類添加ファイバ増幅器においては、信号増幅が可能な領域は、用いる希土類元素の種類に依存し、任意に変更することはできない。また、その平坦利得帯域幅は、最大40nm程度である。現状では、希土類添加ファイバ増幅器においては1510~1530nmの領域および1460nm以下の領域の信号光を増幅することはできない。希土類添加ファイバ増幅器を用いて、100~200nm程度の平坦利得帯域を得るためには、3ないし4波長帯用の増幅器を組み合わせる必要があり、システムの複雑化および高コスト化を招く。

【0004】一方、希土類添加ファイバ増幅器が増幅できない領域の光信号の増幅が可能であり、および任意の波長帯に増幅帯域を設定することができるラマンファイバ増幅器が、近年盛んに研究されてきている。従来技術のシリカファイバを用いたラマン増幅器(以下、シリカラマン増幅器という)の構成を図1(a)に示す。このラマン増幅器については、H.Masuda et al., Tech. Dig. of ECOC, pp. 139-140, 1998に記載されている。この光増幅器は、入力した波長多重の信号光を増幅している。このラマン増幅器は、利得媒質である光ファイバ51と、それを光励起する励起光源53と、その励起光源からの励起光と信号光を合波する合波器52を有する。光ファイバは、おもに高開口数(NA)のシリカファイバである。ただし、通常光ファイバの前後に設置する自明な光部品(アイソレータなど)は、簡単のため図1(a)において省略してある。

【0005】図1(a)の増幅器は、より多くの場合に採用される、信号光と励起光の伝搬方向が逆となる配置、すなわち後方向励起の構造を有する。しかし、前方向励起の増幅器であっても、以下に述べることが同様に成り立つ。励起光源からの励起光の波長は、単数でも複数でもよい。単一波長励起におけるシリカラマン増幅器の利得係数スペクトルを図1(b)に示す。ここで、横軸は信号光波長と励起光波長との差を表す。単一波長励起におけるシリカラマン増幅器の利得係数スペクトルは、100nm付近に単一のピークを有する。このシリカラマン増幅器の平坦利得帯域は、単一波長励起においては高々20nmであった。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】平坦利得帯域の拡大に  
関して、Y.Emori et al.は、Proc. of OFC, PD19, 199

9において、10数波長までの多波長励起を用いて利得スペクトル平坦化・広帯域化を行って、100nmまでの平坦利得帯域を有するシリカラマン増幅器を得ている。この帯域はシリカファイバの物理特性により制限されている。また、このシリカラマン増幅器は、10数個の波長の異なる光源および該光源からの光を合波する光回路を用意する必要があり、非常に高コストである。

【0007】ただし、連続平坦帯域を低コストな増幅器構成で得る場合の典型的な帯域幅は、約60nmが限界であった。

【0008】したがって、WDMシステムにおける大容量化および多チャンネル化を行うために、従来より広帯域(帯域幅60nm以上)で、かつ平坦な利得特性を有する増幅器に対する継続的要求が存在する。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明は、このような問題に鑑みてなされたもので、その目的は、複数の利得スペクトルを組み合わせることで、広帯域で平坦な利得スペクトルを実現するようにした光ファイバ増幅器およびそれを用いた光通信システムを提供することにある。

【0010】本発明者らは、利得媒質としてテルライトガラスを用いるラマン増幅器(以下テルライトラマン増幅器という)において、同一の励起波長を用いる場合、その利得係数スペクトルがシリカラマン増幅器のものよりも長波長側に存在することを見いだした。図2に、単一波長励起によるテルライトラマン増幅器の利得係数スペクトルを示す。ここで、横軸は信号光波長と励起光波長との差を表す。図2から明らかなように、テルライトラマン増幅器は、波長差=170nmおよび90nm付近にピークを有し(以下、それぞれを第1ピークP1および第2ピークP2という)、波長差=120nm付近にくぼみを有する(以下、第1ボトムB1という)。また、第2ピークの短波長側においては、その利得係数が減少している(以下、この領域を第2ボトムB2という)。

【0011】このように、テルライトラマン増幅器においては、そのストークスシフトがシリカラマン増幅器よりも大きく、また第1ピークP1と第2ピークP2の間隔が広いことから、より広帯域の増幅器として用いることができる可能性がある。テルライトラマン増幅器をWDMシステムにおいて用いるためには、第1ピークP1と第2ピークP2との間にある、第1ボトムB1の利得係数を増大させて、その利得係数を平坦化する必要がある。また、第2ボトムB2の利得係数を併せて増大させることができれば、さらに将来のより広帯域を用いるWDMシステム用の増幅器として有用であろうと考えられる。

【0012】また、テルライトラマン増幅器の利得係数はシリカラマン増幅器の利得係数よりも大きいので、よ

り短いテルライトガラスファイバを用いて同等の利得係数を得ることが可能である。このことから、テルライトラマン増幅器を用いることが有利である。

【0013】本発明の第1の態様は、波長の異なる少なくとも2つの励起光で励起されるテルライトファイバを有し、それら励起光の波長が一定量の差を有することを特徴とするラマン増幅器である。ここで、該ラマン増幅器が複数のテルライトファイバを有して、多段構成を採ってもよい(第1および第2実施形態)。

【0014】本発明の第2の態様は、単一光で励起されるテルライトファイバおよび単一光で励起されるシリカファイバを有し、それら励起光の波長が異なることを特徴とするラマン増幅器である(第3～第5実施形態)。

【0015】本発明の第3の態様は、交互に配置される複数のテルライトファイバおよびシリカファイバを有し、それらファイバを波長の異なる少なくとも2つの励起光で励起することを特徴とするラマン増幅器である(第6実施形態)。

【0016】本発明の第4の態様は、単一光で励起されるテルライトファイバおよび波長の異なる複数の光で励起されるシリカファイバを有することを特徴とするラマン増幅器である(第7実施形態)。

【0017】本発明の第5の態様は、波長の異なる複数の光で励起されるテルライトファイバおよび単一光で励起されるシリカファイバを有することを特徴とするラマン増幅器である(第8実施形態)。

【0018】本発明の第6の態様は、波長の異なる複数の光で励起されるテルライトファイバおよび波長の異なる複数の光で励起されるシリカファイバを有することを特徴とするラマン増幅器である。ここで、該ラマン増幅器が波長の異なる複数の光で励起される追加のテルライトファイバをさらに有してもよい(第9および第10実施形態)。

【0019】本発明の第7の態様は、希土類添加ファイバおよびテルライトファイバを有し、それらファイバをそれぞれ異なる波長の励起光で励起することを特徴とするラマン増幅器である(第11～第14実施形態)。

【0020】本発明の第8の態様は、低濃度のエルビウムを添加したテルライトファイバを有する、該ファイバを2つの励起光で励起することを特徴とするラマン増幅器である(第15および第16実施形態)。

【0021】本発明の第9の態様は、テルライトファイバおよび伝送経路をなすシリカファイバを有し、それらファイバをそれぞれ異なる波長の励起光で励起することを特徴とする光通信システムである(第17実施形態)。

【0022】本発明の第10の態様は、単一光または波長の異なる複数の光で励起されるテルライトファイバ、単一光または波長の異なる複数の光で励起される第1のシリカファイバおよび単一光または波長の異なる複数の

光で励起される伝送経路をなす第2のシリカファイバを有することを特徴とする光通信システムである(第18実施形態)。

【0023】本発明の光ファイバ増幅器は、テルライトファイバを用いることを基本とするラマンファイバ増幅器であり、1)テルライトファイバを2波長で励起すること、2)テルライトファイバとシリカファイバをそれぞれ異なる波長で励起すること、3)Erを低濃度に添加したテルライトファイバを1つ又は2つの波長で励起すること、および4)テルライトファイバとTm添加ファイバを異なる波長で励起することを適宜組み合わせ、平坦利得帯域の拡大、雑音指数の低下、および増幅器の出力増大などの効果を提供するものである。また、前述の効果を少数の励起光源を用いて達成することが可能であるので、増幅器の低コスト化にも有利である。

【0024】さらに、本発明の光通信システムは、テルライトファイバを用いた中継器および分布増幅を行うシリカファイバ伝送線路を用いるシステムであり、上記の手段を適宜組み合わせて、少数の励起光源を用いて、平坦利得帯域の拡大、雑音指数の低下、および増幅器の出力増大などの効果を提供するものである。

【0025】

【発明の実施の形態】本発明は、テルライトファイバを用いるラマン増幅器および光通信システムに関し、特に、伝送光ファイバの低損失波長帯である1.3～1.5 $\mu$ m帯の信号光のためのラマン増幅器およびそれを用いる光通信システムに関する。一般に、ラマン増幅器は、その励起光波長を選択することで、任意の波長域で増幅を行うことができる。

【0026】本明細書で用いられる際に、2つの要素を「直列に接続する」とは、それら2つの要素の間で分岐されることなしに、信号光が伝搬することを意味する。これは、それら2つの要素の間に慣用の光部品(励起光を導入するための合波器など)が介在することを排除することを意図しない。

【0027】(第1実施形態)本発明の第1の実施形態は、テルライトファイバと、互いに異なる励起光波長を有する2つのレーザ光源とを有し、前記2つのレーザ光源からの励起光の波数の差の絶対値が125～290 $\text{cm}^{-1}$ である、図3に示される光ファイバ増幅器である。

【0028】図3において、利得媒質である光ファイバはテルライトファイバ1である。2つのレーザ光源5aおよび5bからの励起光は、合波器4によって合波され、その後、合波器2を介して信号光とは逆方向からテルライトファイバ1に入射している。

【0029】用いることができるテルライトファイバは、 $\text{TeO}_2\text{--ZnO--M}_2\text{O--L}_2\text{O}_3$ または $\text{TeO}_2\text{--ZnO--M}_2\text{O--L}_2\text{O}_3\text{--QO}_2$ の組成を有する。該組成中、Mは1種または複数のアルカリ金属を、

Lは、B、Bi、La、Al、Ce、YbまたはLuの少なくとも1種以上を、およびQはGe、SiまたはTiの少なくとも1種以上を表わす。また、テルライトファイバを、分散補償ファイバ（分散シフトファイバ、分散フラットファイバ等）としてもよい。

【0030】レーザ光源5a、5bとして、半導体レーザモジュール（LDM）またはラマンレーザなどを用いることができる。特に、LDMは小型・高信頼・長寿命である等の理由でより実用的である。そこで、本発明の以下の実施形態においても、レーザ光源としてLDMを用いる。ただし、LDM以外のレーザモジュールを用いても、同様の効果が得られることは明らかである。2つのLDM5a、5bをLDM-1およびLDM-2とし、それらの励起光波長をそれぞれ $\lambda_1$ および $\lambda_2$ とする。

【0031】また、図3においては、LDM-1およびLDM-2からの励起光を合波した複数波長の励起光を、合波器2を介してテルライトファイバ1に入射している。しかし、LDM-1およびLDM-2からの励起光を合波せずに、それぞれテルライトファイバ1に入射してもよい。

【0032】さらに、図3においては、信号光入射方向と励起光入射方向とが逆である後方向励起の配置を示したが、信号光入射方向と励起光入射方向とが同一である前方向励起を用いてもよい。

【0033】あるいはまた、図3のテルライトファイバ1または合波器2より後に、利得等化器を設置して、利得係数スペクトルのさらなる平坦化を行ってもよい。

【0034】本実施形態のラマン増幅器の平坦利得帯域の拡大を実施するためには、波長 $\lambda_1$ の励起光を用いた利得係数スペクトルの第1ボトムを、波長 $\lambda_2$ の励起光を用いた利得係数の第1ピークで補償するように、 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ を設定する必要がある。図2に示した利得係数スペクトルから明らかなように、 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ の差を30nm～70nmとしたときに、平坦利得帯域の拡大を達成することができる。 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ の差は、より好ましくは35nm～60nmであり、および最も好ましくは40nm～50nmである。特に好ましくは $\lambda_1 - \lambda_2$ が50nmである。

【0035】ラマン増幅器は、励起光波長に応じた任意の波長域で動作可能であり、その利得帯域は、波長よりもむしろエネルギーまたは波数（ $\text{cm}^{-1}$ 、カイザーと読む）で正確に規定される。たとえば、上記の1.55 $\mu\text{m}$ 帯における波長差30nm～50nmは、約125～290 $\text{cm}^{-1}$ の波数差に等しい。この波数差は、任意の波長帯で保持される。なお、125 $\text{cm}^{-1}$ の波数差は、1.55 $\mu\text{m}$ 帯では波長差30nmに相当するが、1.4 $\mu\text{m}$ 帯では、その0.82倍の波長差24.5nmに相当する。

【0036】あるいはまた、前記2つのレーザ光源に代

えて、互いに異なる励起光波長を有する3つ以上のレーザ光源を有してもよい。すなわち、3つ以上のレーザ光源を用いる場合であっても、実質的に上記と同じ励起波長配置とみなされるものであればよい。具体的には、前記3つ以上のレーザ光源を波長領域が重ならない2つの波長群に分け、それらの重心波長に対応する励起光の波数の差の絶対値が125～290 $\text{cm}^{-1}$ であってもよい。

【0037】重心波長 $\lambda_c$ は、n波長（ $\lambda_1 \sim \lambda_n$ ）の波長群の光のパワーがそれぞれ $P_1 \sim P_n$ のとき

【0038】

【数1】

$$\lambda_c = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

【0039】で定義される。

【0040】これを定量的に述べると、第1の波長群を $\lambda_{11} \sim \lambda_{1n}$ とし、第2の波長群を $\lambda_{21} \sim \lambda_{2m}$ （ただし、 $\lambda_1 \sim \lambda_{1n} > \lambda_{21} \sim \lambda_{2m}$ である）とし、第1の波長群の重心波長を $\lambda_{1c}$ とし、および第2の波長群の重心波長を $\lambda_{2c}$ としたとき、 $\lambda_{1c}$ および $\lambda_{2c}$ の差が30nm～70nmであればよい。したがって、重心波長 $\lambda_{1c}$ および $\lambda_{2c}$ に相当する光の間の波数差の絶対値は、125～290 $\text{cm}^{-1}$ である。

【0041】例えば、励起光の波長およびパワーが、それぞれ、1460nm、200mW；1450nm、50mW；1410nm、200mW；および1400nm、50mWである4波長構成を用いてもよい。この際、1460nm、200mW；1450nm、50mWの2つの励起光の重心波長は1458nmであり、および1410nm、200mW；1400nm、50mWの2つの励起光の波長重心は1408nmである。この2つの重心波長の差は50nmであるので、この4波長構成は、上述した2波長励起の構成と等価である。

【0042】上記のような励起光の波長設定を用いて平坦利得帯域の拡大を行うためには、各励起光により得られる利得係数の大きさを制御する必要がある。利得係数の制御は、各光源LDM-1およびLDM-2の出力パワーを適切に設定することによって実施される。

【0043】【実施例1】図3のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を1460nmとし、およびパワーを500mWとした。またLDM-2からの励起光の波長を1410nmとし、およびパワーを500mWとした。テルライトファイバ1の長さは200mであった。

【0044】本実施例より得られた利得（dB単位の相対値）スペクトルを、図4（a）に示す。本実施例においては、約1500nm～約1650nmの約150nmの範囲（平坦利得帯域）で平坦化された利得スペクトルが得られた。この平均利得帯域は、従来技術の約60

nmの平坦利得帯域幅よりも顕著に拡大されている。

【0045】また、本実施例で用いるテルライトファイバは、従来技術のシリカラマン増幅器のシリカファイバに比べて、著しく短い、ほぼ同等もしくはそれ以上の利得係数を有した。

【0046】[実施例2] LDM-2からの励起光の波長を1420nmとした点を除いて、実施例1を繰り返した。

【0047】本実施例より得られた利得スペクトルを、図4(b)に示す。本実施例においても、約1500nm〜約1650nmの約150nmの範囲(平坦利得帯域)で平坦化された利得スペクトルが得られた。この平均利得帯域は、従来技術の約60nmの平坦利得帯域幅よりも顕著に拡大されている。

【0048】(第2実施形態)本発明の第2の実施形態は、2個のテルライトファイバと、それらテルライトファイバの中間に設置した利得等化器と、互いに異なる励起光波長( $\lambda_1$ および $\lambda_2$ )を有する2つのレーザ光源とを有する、図5に示される光ファイバ増幅器である。

【0049】図5において、テルライトファイバ1a、合波器2a、利得等化器15、テルライトファイバ1b、および合波器2bが直列に接続されている。2つのレーザ光源5aおよび5bからの励起光は、合波器4によって合波される。合波された励起光は、分波器16によって分波され、一方は合波器2aに導かれテルライトファイバ1aを励起し、他方は合波器2bに導かれテルライトファイバ1bを励起する。

【0050】本実施形態に用いられるテルライトファイバは、第1実施形態に記載したものと同様である。

【0051】励起光は、2個のテルライトファイバのそれぞれに対して供給される。その際に、それぞれのテルライトファイバ用の励起光源を別個に設けてもよいが、ラマン増幅器の構成の簡易化および低コスト化のためには、図5に示される1つの光源装置3を用いることが好ましい。3つ以上のレーザ光源を用いる際も同様である。また、図5には後方向励起の配置が記載されているが、本実施形態において前方向励起を行ってもよい。

【0052】本実施形態のラマン増幅器の平坦利得帯域の拡大を実施するために波長 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ が満たすべき条件は、第1の実施形態に記載されたものと同一である。すなわち $\lambda_1$ および $\lambda_2$ の差を30nm〜70nmとしたときに、平坦利得帯域の拡大を達成することができる。また、1.55 $\mu$ m帯の信号を増幅するための波長帯において、前記波長差30nm〜50nmに対応した2つの励起光の波数差は、約125〜290 $\text{cm}^{-1}$ である。

【0053】あるいはまた、第1の実施形態同様に3つ以上のレーザ光源からの励起光を用いてもよい。その場合には、それら3つ以上の励起光を波長領域が重ならない2つの波長群に分け、それらの重心波長に対応する励

起光の波数の差の絶対値が125〜290 $\text{cm}^{-1}$ であるように、それら励起光の波長を設定する。

【0054】利得等化器15をテルライトファイバ1aと1bとの間の位置に設置するのは、ラマン増幅器の出力パワーを高く保つためである。このとき、信号光は、利得等化器15により所望の損失を受けた後に後段のテルライトファイバ1bで増幅されるので、ラマン増幅器の出力パワーは、後段のテルライトファイバ1bの出力パワーで決定され、高い値を得ることができる。一方、利得等化器15を最終段(final stage)、すなわちテルライトファイバ1bの後に設置した場合には、得られる出力パワーは、テルライトファイバ1bの出力パワーから、利得等化器15の損失分だけ低下したものになる。

【0055】利得等化器の透過損失スペクトル特性は、例えば、図4の利得スペクトルを考慮して決定される。例えば、図4(a)の利得スペクトルに対しては、透過損失スペクトルのピーク波長が約1560nm、透過損失スペクトルの半値幅が約20nmのガウス型形状の透過損失スペクトルを有する利得等化器により、約1500〜1650nmの波長域において概略的な利得等化を簡単にこなせる。

【0056】[実施例3] 図5のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を1460nmとし、およびパワーを500mWとした。またLDM-2からの励起光の波長を1410nmとし、およびパワーを500mWとした。テルライトファイバ1aおよび1bの長さは、それぞれ200mおよび180mであった。ピーク波長約1560nm、ピーク損失8dBおよび半値幅約20nmを有するガウス型形状の透過損失スペクトルを有する利得等化器を用いた。

【0057】本実施例のラマン増幅器においては、約1500〜1650nmの波長域において平坦な利得スペクトルが得られた。また、利得スペクトル平坦性が、利得等化器を用いない場合に比較して、8dB向上した。

【0058】(第3実施形態)本発明の第3の実施形態は、テルライトファイバと、シリカファイバと、互いに異なる励起光波長を有する2つのレーザ光源と、それらレーザ光源からの励起光を信号光と合波する2つの合波器を有する、図6に示される光ファイバ増幅器である。

【0059】図6においては、テルライトファイバ1、合波器2a、シリカファイバ11、および合波器2bが直列に接続され、第1のレーザ光源5aからの励起光( $\lambda_1$ )は合波器2aを介してテルライトファイバ1を励起し、および第2のレーザ光源5bからの励起光( $\lambda_2$ )は合波器2bを介してシリカファイバ11を励起する。

【0060】本実施形態においては、第1のレーザ光源からの励起光( $\lambda_1$ )によって得られるテルライトファイバの利得係数スペクトルの第1ボトムを、第2のレーザ光源からの励起光( $\lambda_2$ )によって得られるシリカフ

ファイバの利得係数スペクトルのピークに重ねることによって、補償する。 $\lambda 1$ および $\lambda 2$ の差を、 $\lambda 2 - \lambda 1 = 25 \pm 15 \text{ nm}$ 、すなわち、 $10 \text{ nm} < \lambda 2 - \lambda 1 < 40 \text{ nm}$ に設定することにより、このような補償を達成することができる。 $\lambda 1$ および $\lambda 2$ の差 $\lambda 2 - \lambda 1$ は、より好ましくは $15 \text{ nm} \sim 35 \text{ nm}$ 、および最も好ましくは $20 \text{ nm} \sim 30 \text{ nm}$ である。また、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の信号を増幅するための励起光の波長帯において、前記波長差 $10 \text{ nm} \sim 40 \text{ nm}$ に対応した2つの励起光の波数差は、約 $42 \sim 166 \text{ cm}^{-1}$ である。

【0061】シリカファイバ11の最適なファイバパラメータは、高速（例えば $10 \text{ Gbit/s}$ ）の光通信システムで用いられる分散補償ファイバ（DCF）に類似しているため、DCFを本実施形態のシリカファイバ11として用いることができる。ここで、DCFとは、伝送ファイバの屈折率の波長分散により歪んだ光パルスの波形を補償するための、逆分散特性を有するファイバのことである。具体的には、 $1.3 \mu\text{m}$ ゼロ分散ファイバを用いた伝送路用の典型的なDCFと、典型的なラマン増幅用のシリカファイバの組成、開口数はほぼ同じである。また、典型的なテルライトファイバの場合には、たとえば、 $1.5 \mu\text{m}$ 帯で負分散を有しているため、上記のシリカファイバと同様に分散補償ファイバとして用いることが可能である。

【0062】本実施形態においては、テルライトファイバ1を、信号光に対して前段に配置することが好ましい。なぜなら、その配置の方が雑音指数が低いからである。これは、シリカファイバのラマン利得帯域がテルライトファイバのものよりも狭いことに起因する。たとえば、 $\lambda 1 = 1450 \text{ nm}$ の場合、テルライトファイバのラマン利得は $1460 \sim 1620 \text{ nm}$ である程度の値を有する。この場合シリカファイバ用の励起光の波長 $\lambda 2$ を約 $1475 \text{ nm}$ に設定する必要がある。しかし、シリカファイバにおけるラマン利得は $\lambda 2 + 130 \text{ nm}$ 以下の領域（この場合 $1605 \text{ nm}$ 以下）に限定される。もしシリカファイバを前段に配置した場合、 $\lambda 2 + 130 \text{ nm}$ より長波長域（ $1605 \text{ nm}$ より長波長の領域）で、シリカファイバ内での損失による雑音指数の劣化（増加）が生じる。したがって、テルライトファイバを前段に配置することが好ましい。

【0063】上記のような励起光の波長設定を用いて平坦利得帯域の拡大を行うためには、各励起光により得られる利得係数の大きさを制御する必要がある。利得係数の制御は、各光源LDM-1およびLDM-2の出力パワー、並びにシリカファイバおよびテルライトファイバの長さを適切に設定することによって実施される。

【0064】[実施例4] 図6のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を $1450 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $300 \text{ mW}$ とした。またLDM-2からの励起光の波長を $1475 \text{ nm}$ とし、およびパワー

を $300 \text{ mW}$ とした。テルライトファイバ1の長さは $200 \text{ m}$ であり、およびシリカファイバ11の長さは $5 \text{ km}$ であった。

【0065】本実施例のラマン増幅器においては、約 $1550 \sim 1630 \text{ nm}$ の波長域において平坦な利得スペクトル（平坦利得帯域幅 $80 \text{ nm}$ ）が得られた。

【0066】（第4実施形態）本発明の第4の実施形態は、テルライトファイバと、シリカファイバと、互いに異なる励起光波長を有する第1および第2のレーザ光源と、それら第1および第2のレーザ光源からの励起光を合波する合波器とを有する、図7に示される光ファイバ増幅器である。

【0067】図7において、テルライトファイバ1、シリカファイバ11、および合波器2が直列に接続されており、第1のレーザ光源5aからの励起光（ $\lambda 1$ ）および第2のレーザ光源5bからの励起光（ $\lambda 2$ ）が合波器4によって合波され、そして合波器2を介して、シリカファイバ11、テルライトファイバ1の順に伝搬される。信号光はテルライトファイバ側から入射する（すなわち、テルライトファイバが信号光に対する前段に位置する）。

【0068】本実施形態において用いられるテルライトファイバおよびシリカファイバは、第3実施形態において記載されたものと同一である。

【0069】第1および第2レーザ光源5aおよび5bからの異なる波長の2つの励起光は、まずシリカファイバ11を励起した後、シリカファイバ11で損失を受けなかった分がシリカファイバ11から出射する。その後、シリカファイバから出射する2つの励起光が、テルライトファイバ1を励起する。

【0070】本実施形態においては、第1のレーザ光源からの励起光（ $\lambda 1$ ）によって得られるテルライトファイバの利得係数スペクトルの第1ボトムを、第2のレーザ光源からの励起光（ $\lambda 2$ ）によって得られるシリカファイバの利得係数スペクトルのピークに重ねることによって、補償する。 $\lambda 1$ および $\lambda 2$ の差を、 $\lambda 2 - \lambda 1 = 25 \pm 15 \text{ nm}$ 、すなわち、 $10 \text{ nm} < \lambda 2 - \lambda 1 < 40 \text{ nm}$ に設定することにより、このような補償を達成することができる。 $\lambda 1$ および $\lambda 2$ の差 $\lambda 2 - \lambda 1$ は、より好ましくは $15 \text{ nm} \sim 35 \text{ nm}$ 、および最も好ましくは $20 \text{ nm} \sim 30 \text{ nm}$ である。また、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の信号を増幅するための励起光の波長帯において、前記波長差 $10 \text{ nm} \sim 40 \text{ nm}$ に対応した2つの励起光の波数差は、約 $42 \sim 166 \text{ cm}^{-1}$ である。

【0071】なお、本実施形態のラマン増幅器全体の利得係数スペクトルは、波長 $\lambda 1$ の励起光によるシリカファイバの利得係数スペクトル、シリカファイバによる波長 $\lambda 1$ の励起光の減衰および波長 $\lambda 2$ の励起光によるテルライトファイバの利得係数スペクトルを包含するため、同一の $\lambda 1$ および $\lambda 2$ を用いる第3実施形態のラマ



ン増幅器のものとは若干異なるものである。

【0072】本実施形態のラマン増幅器において、テルライトファイバ1を信号光に対して前段に配置することが好ましいが、シリカファイバ11とテルライトファイバ1とを入れ替えて、シリカファイバ11を前段に配置してもよい。

【0073】[実施例5]図7のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を1450nmとし、およびパワーを300mWとした。またLDM-2からの励起光の波長を1475nmとし、およびパワーを300mWとした。テルライトファイバ1の長さは200mであり、およびシリカファイバ11の長さは5kmであった。

【0074】本実施例のラマン増幅器においては、約1550~1630nmの波長域において平坦な利得スペクトル(平坦利得帯域幅80nm)が得られた。

【0075】(第5実施形態)本発明の第5の実施形態は、テルライトファイバと、シリカファイバと、互いに異なる励起光波長を有する第1および第2のレーザ光源と、前記テルライトファイバと前記シリカファイバとの間に配置された第1または第2のレーザ光源からの励起光のいずれか一方を反射する反射素子とを有する、図8に示される光ファイバ増幅器である。

【0076】図8において、テルライトファイバ1、反射素子12、シリカファイバ11、および合波器2が直列に接続されており、第1のレーザ光源5aからの励起光( $\lambda 1$ )および第2のレーザ光源5bからの励起光( $\lambda 2$ )が合波器4によって合波され、そして合波器2を介して、シリカファイバ11に入射する。信号光はテルライトファイバ側から入射する(すなわち、テルライトファイバが信号光に対する前段に位置する)。

【0077】反射素子12は、波長 $\lambda 2$ の励起光のみを選択的に反射するものであり、ファイバグレーティングなどを用いることができる。

【0078】本実施形態においては、合波器2からシリカファイバ11に入射する波長 $\lambda 1$ および $\lambda 2$ の励起光は、共にシリカファイバを励起し、シリカファイバ11を射出する。そして、波長 $\lambda 2$ の励起光のみが反射素子12によって反射され、再びシリカファイバ11に入射し、それを励起するために用いられる。一方、波長 $\lambda 1$ の励起光は、反射素子12を通過し、テルライトファイバ1に入射し、それを励起する。

【0079】本実施形態においても、第4の実施形態と同様に、第1のレーザ光源からの励起光( $\lambda 1$ )によって得られるテルライトファイバの利得係数スペクトルの第1ボトムを、第2のレーザ光源からの励起光( $\lambda 2$ )によって得られるテルライトファイバの利得係数スペクトルのピークに重ねることによって、補償する。 $\lambda 1$ および $\lambda 2$ の差を、 $\lambda 2 - \lambda 1 = 25 \pm 15 \text{ nm}$ 、すなわち、 $10 \text{ nm} < \lambda 2 - \lambda 1 < 40 \text{ nm}$ に設定することに

より、このような補償を達成することができる。 $\lambda 1$ および $\lambda 2$ の差 $\lambda 2 - \lambda 1$ は、より好ましくは15nm~35nm、および最も好ましくは20nm~30nmである。また、1.55 $\mu\text{m}$ 帯の信号を増幅するための励起光の波長帯において、前記波長差10nm~40nmに対応した2つの励起光の波数差は、約42~166 $\text{cm}^{-1}$ である。

【0080】なお、本実施形態のラマン増幅器全体の利得係数スペクトルは、波長 $\lambda 1$ の励起光によるシリカファイバの利得係数スペクトル、およびシリカファイバによる波長 $\lambda 1$ の励起光の減衰を包含するために、同一の $\lambda 1$ および $\lambda 2$ を用いる第3および第4の実施形態のラマン増幅器のものとは若干異なるものである。

【0081】本実施形態においては、テルライトファイバ1を信号光に対して前段に配置することが好ましい。その理由は、第3実施形態に記載したとおりである。しかし、シリカファイバ11とテルライトファイバ1の位置を逆にし、かつ反射素子(ファイバグレーティング)の中心波長を $\lambda 1$ として、シリカファイバを前段に配置し、かつ波長 $\lambda 1$ の光がテルライトファイバ1のみを励起するような構成においても同様の効果がえられる。

【0082】[実施例6]図8のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長 $\lambda 1$ を1450nmとし、およびパワーを300mWとした。またLDM-2からの励起光の波長 $\lambda 2$ を1475nmとし、およびパワーを200mWとした。テルライトファイバ1の長さは200mであり、およびシリカファイバ11の長さは5kmであった。

【0083】本実施例のラマン増幅器においては、約1550~1630nmの波長域において平坦な利得スペクトル(平坦利得帯域幅80nm)が得られた。さらに、波長 $\lambda 2$ の励起光のパワーが実施例5よりも低下することができた。なぜなら、反射素子12を設けて、反射素子12における反射により波長 $\lambda 2$ の光がシリカファイバ11のみを励起するような構成にしたからである。

【0084】(第6実施形態)本発明の第6の実施形態は、複数のテルライトファイバと、複数のシリカファイバと、互いに異なる励起光波長を有する2つのレーザ光源と、それらレーザ光源からの励起光を合波する合波器とを有する光ファイバ増幅器であって、前記複数のテルライトファイバのそれぞれと前記複数のシリカファイバのそれぞれとは互いに隣接するように配置される、図9に示される光ファイバ増幅器である。

【0085】図9において、テルライトファイバ1aおよび1bとシリカファイバ11aおよび11bとが交互に配置され、それらファイバの信号光に対して後段に合波器2が接続されている。第1のレーザ光源5aからの励起光( $\lambda 1$ )および第2のレーザ光源5bからの励起光( $\lambda 2$ )が合波器4によって合波され、そして合波器

2を介して、交互に配置されたファイバに入射する。

【0086】2つの励起光の波長 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ が満たすべき条件は、第4実施形態と同様である。 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ の差を、 $\lambda_2 - \lambda_1 = 25 \pm 15 \text{ nm}$ 、すなわち、 $10 \text{ nm} < \lambda_2 - \lambda_1 < 40 \text{ nm}$ に設定することが好ましい。 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ の差 $\lambda_2 - \lambda_1$ は、より好ましくは $15 \text{ nm} \sim 35 \text{ nm}$ 、および最も好ましくは $20 \text{ nm} \sim 30 \text{ nm}$ である。また、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯の信号を増幅するための励起光の波長帯において、前記波長差 $10 \text{ nm} \sim 40 \text{ nm}$ に対応した2つの励起光の波数差は、約42

【0087】図9においては、2つのテルライトファイバおよび2つのシリカファイバを交互に配置した例を示したが、それらファイバが交互に配置される限り、その数は3個以上任意のものであってもよい。

【0088】長さの短い複数のファイバを用いる本実施形態においては、雑音指数の低減を達成することができる。もしテルライトファイバの第1ボトムまたは第2ボトムにおける利得係数が小さい場合、テルライトファイバによる損失のために雑音が増大する。雑音の増大の程度は、ファイバの長さ、ひいてはdB単位におけるファイバ損失に比例する。すなわち、本実施形態の短いファイバにおいて、その雑音の程度は長いファイバを用いた場合よりも少ない。そして次段のシリカファイバにおいて、テルライトファイバの第1ボトムまたは第2ボトムの領域の信号が増幅され、それによって、より雑音の少ない信号を得ることができるのである。

【0089】本実施形態においては、テルライトファイバ1aが信号光の入射方向に対して最前段に位置している。しかし、本実施形態における各ファイバにおける雑音の増大の程度が小さいので、シリカファイバ11aを最前段とする構成を採っても同等の効果を得ることができる。

【0090】[実施例7] 図9のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を $1450 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $300 \text{ mW}$ とした。またLDM-2からの励起光の波長を $1475 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $300 \text{ mW}$ とした。各テルライトファイバ1aおよび1bの長さは $100 \text{ m}$ であり、および各シリカファイバ11aおよび11bの長さは $2.5 \text{ km}$ であった。

【0091】本実施例のラマン増幅器においては、約 $1460 \sim 1620 \text{ nm}$ の波長域において平坦な利得スペクトル（平坦利得帯域幅 $160 \text{ nm}$ ）が得られた。また、実施例5における雑音指数のスペクトル上の最大値が $8 \text{ dB}$ であったのに対し、本実施例の雑音指数のスペクトル上の最大値は $6 \text{ dB}$ であった。

【0092】（第7実施形態）本発明の第7の実施形態は、互いに異なる波長の励起光を発する第1、第2および第3のレーザ光源と、第1のレーザ光源からの励起光により励起されるテルライトファイバと、第2および第

3のレーザ光源からの励起光により励起されるシリカファイバとを有する図10に示されるラマン増幅器である。

【0093】図10においては、テルライトファイバ1、合波器2a、シリカファイバ11および合波器2bが直列に接続されている。信号光はテルライトファイバ1の側に入射する。第1のレーザ光源5aからの励起光は合波器2aを介してテルライトファイバ1に入射する。第2および第3のレーザ光源5bおよび5cからの励起光は、合波器4により合波され、そして合波器2bを介してシリカファイバ11に入射する。

【0094】本実施例において、 $\lambda_2$ は、波長 $\lambda_2$ の光により励起されるシリカラマン増幅器の利得スペクトルのピークが、図2に示されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第1ボトムに位置するように設定される。また、 $\lambda_3$ は、波長 $\lambda_3$ の光によりシリカラマン増幅器の利得スペクトルのピークが、図2に示されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第2ボトムに位置するように設定される。このような設定を行うことにより、テルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第1および第2ボトムを、シリカラマン増幅器の利得スペクトルの2つのピークが補償するため、広い波長域で平坦なスペクトルが得られる。

【0095】上記のような補償を実現するために、 $\lambda_1$ と $\lambda_2$ との差は、 $\lambda_2 - \lambda_1 = 25 \pm 15 \text{ nm}$ 、すなわち $10 \text{ nm} < \lambda_2 - \lambda_1 < 40 \text{ nm}$ に設定される。これは、本実施例において用いる波長帯において、第1の励起光の波数と、第2の励起光の波数との差が、 $42 \sim 166 \text{ cm}^{-1}$ に相当する。さらに、 $\lambda_1$ と $\lambda_3$ との差は、 $\lambda_1 - \lambda_3 = 40 \pm 30 \text{ nm}$ 、すなわち $10 \text{ nm} < \lambda_1 - \lambda_3 < 70 \text{ nm}$ に設定される。これは、本実施例において用いる波長帯において、第1の励起光の波数と、第2の励起光の波数との差が、 $42 \sim 166 \text{ cm}^{-1}$ に相当する。

【0096】本実施形態において、図10に示されるように信号光の入射方向に対して前段にテルライトファイバを配置することが好ましい。その理由は第4実施形態において述べたとおりである。しかし、シリカファイバを前段におくことも可能である。

【0097】[実施例8] 図10のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を $1450 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $300 \text{ mW}$ とした。またLDM-2からの励起光の波長を $1475 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $150 \text{ mW}$ とした。さらにLDM-3からの励起光の波長を $1410 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $150 \text{ mW}$ とした。テルライトファイバ1の長さは $200 \text{ m}$ であり、およびシリカファイバ11の長さは $5 \text{ km}$ であった。このように設定された本実施例のラマン増幅器の利得スペクトルを図11(b)に示す。

【0098】本実施例のラマン増幅器においては、約1

500 nm～約1630 nmにおいて平坦な利得スペクトル（平坦利得帯域幅130 nm）が得られた。

【0099】（第8実施形態）本発明の第8の実施形態は、互いに異なる波長の励起光を発する第1、第2および第3のレーザ光源と、第1および第2のレーザ光源からの励起光により励起されるテルライトファイバと、第3のレーザ光源からの励起光により励起されるシリカファイバとを有する図12に示されるラマン増幅器である。

【0100】図12においては、テルライトファイバ1、合波器2a、シリカファイバ11および合波器2bが直列に接続されている。信号光はテルライトファイバ1の側に入射する。第1および第2のレーザ光源5aおよび5bからの励起光は、合波器4により合波され、そして合波器2aを介してテルライトファイバ1に入射する。第3のレーザ光源5cからの励起光は合波器2bを介してシリカファイバ11に入射する。

【0101】本実施例において、 $\lambda_2$ は、波長 $\lambda_2$ の光により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第1ピークが、波長 $\lambda_1$ により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第1ボトムに位置するように設定される。また、この設定を行うことにより波長 $\lambda_2$ の光により励起されるテルライトラマン増幅器の第2ピークが、波長 $\lambda_1$ の光により励起されるテルライトラマン増幅器の第2ボトムに位置する。さらに、 $\lambda_3$ も同様に、波長 $\lambda_3$ の光によりシリカラマン増幅器の利得スペクトルのピークが、波長 $\lambda_1$ により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第1ボトムに位置するように設定される。すなわち、本実施例においては、波長 $\lambda_1$ の光を用いる励起による利得スペクトルの第1ボトムを、波長 $\lambda_2$ および波長 $\lambda_3$ の光による利得スペクトルのピークにより、波長 $\lambda_1$ の利得スペクトルの第2ボトムを波長 $\lambda_2$ の利得スペクトルの第2ピークにより補償することができる。このような設定を行うことにより、広い波長域で平坦なスペクトルが得られる。ただし、一般的に、第7実施形態の構成と比較してスペクトル平坦性が劣るため、テルライトファイバ1とシリカファイバ11との間、好ましくは合波器2aとシリカファイバ11との間に、利得等化器を設けて、平坦性を高めることが好ましい。

【0102】上記のような補償を実現するために、 $\lambda_1$ と $\lambda_2$ との差は、 $\lambda_1 - \lambda_2 = 40 \pm 30$  nm、すなわち  $10 \text{ nm} < \lambda_1 - \lambda_2 < 70 \text{ nm}$  に設定される。これは、本実施例において用いる波長帯において、第1の励起光の波数と、第2の励起光の波数との差が、 $42 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$  に相当する。さらに、 $\lambda_1$ と $\lambda_3$ との差は、 $\lambda_1 - \lambda_3 = 25 \pm 15$  nm、すなわち  $10 \text{ nm} < \lambda_1 - \lambda_3 < 40 \text{ nm}$  に設定される。これは、本実施例において用いる波長帯において、第1の励起光の波数と、第2の励起光の波数との差が、 $42 \sim 166 \text{ cm}^{-1}$  に相当する。

に相当する。

【0103】本実施例の構成において、信号光に対して前段に配置されるテルライトファイバの第1ボトムの大きさ（第1ピークにおける利得と第1ボトムにおける利得の差）は、テルライトファイバを単一波長の光で励起する第7実施形態のものより小さい。したがって、本実施例では、第1ボトムの波長域におけるテルライトファイバの最低利得をより大きくすることができる。その結果、より低い雑音指数およびより高い信号光出力が得られる。

【0104】上記の効果を具体的に説明する。図13は、波長 $\lambda_1$ の光のみによる1波長励起の利得（オンオフ利得）スペクトル（実線）、ならびに波長 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ の光による2波長励起の場合の利得（オンオフ利得）スペクトル（破線）を示す図である。テルライトファイバおよびそれに隣接する合波器などの光部品の挿入損失は、約6 dBである。したがって、1波長励起の場合、第1ボトムB1における正味のラマン利得は、 $-0.5 \text{ dB}$ 程度である。一方、2波長励起の場合、該領域における正味のラマン利得は4 dB程度であり、それは1波長励起の場合よりも著しく大きい。

【0105】また2波長励起されるテルライトファイバと1波長励起されるシリカファイバとを組み合わせる場合、2波長励起されるテルライトファイバの第1ピーク波長における利得係数（dB単位）と第2ピーク波長における利得係数（dB単位）との比を適切に設定することが必要である。図2に示されるように1波長励起時の第1ピークP1の利得係数：第2ピークP2の利得係数の比は、100：70である。2波長励起を実施する場合に、第1ピークP1の利得係数：第2ピークP2の利得係数の比を、100：80～100：100に設定することが好ましい。この設定においては、テルライトファイバの利得スペクトルとシリカファイバの利得スペクトルとのマッチングが良好となり、この範囲外の利得定数の比を有する場合よりも、平坦なスペクトルが得られる。

【0106】第2ピークの利得係数を第1ピークの利得係数より小さくすることが好ましいのは、シリカファイバの利得係数スペクトルの非対称性に起因する。図1

(b)に示されるように、シリカファイバの利得係数は、そのピークの短波長側では、長波長側よりも緩やかに減少する。テルライトファイバの第1ボトムにシリカファイバの利得ピークを一致させた場合、テルライトファイバの第2ピークP2の領域は、シリカファイバの緩やかに減少する利得スペクトルに重なって、その利得が補償されるが、一方テルライトファイバの第1ピークP1の領域の利得は、シリカファイバの利得スペクトルによってはほとんど補償されない。したがって、あらかじめテルライトファイバの利得スペクトルの第2ピークを小さくすることによって、増幅器全体として平坦な利得

スペクトルが得られる。

【0107】[実施例9]図12のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を1450nmとし、およびパワーを200mWとした。またLDM-2からの励起光の波長を1410nmとし、およびパワーを200mWとした。さらにLDM-3からの励起光の波長を1475nmとし、およびパワーを200mWとした。テルライトファイバ1の長さは200mであり、およびシリカファイバ11の長さは5kmであった。

【0108】本実施例のラマン増幅器においては、約1550nm〜約1630nmにおいて平坦な利得スペクトル(平坦利得帯域幅80nm)が得られた。

【0109】(第9実施形態)本発明の第9の実施形態は、互いに異なる波長の励起光を発する第1、第2、第3および第4のレーザ光源と、第1および第2のレーザ光源からの励起光により励起されるテルライトファイバと、第3および第4のレーザ光源からの励起光により励起されるシリカファイバとを有する図14に示されるラマン増幅器である。

【0110】図14においては、テルライトファイバ1、合波器2a、利得等化器15、シリカファイバ11および合波器2bが直列に接続されている。信号光はテルライトファイバ1の側に入射する。第1および第2のレーザ光源5aおよび5bからの励起光は、合波器4aにより合波され、そして合波器2aを介してテルライトファイバ1に入射する。第3および第4のレーザ光源5cおよび5dからの励起光は、合波器4bにより合波され、そして合波器2bを介してテルライトファイバ1に入射する。

【0111】本実施例において、 $\lambda 2$ は、第8実施形態と同様に、波長 $\lambda 1$ により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第1ボトムB1を補償するようにに設定される。また、 $\lambda 3$ も同様に、波長 $\lambda 3$ の光によりシリカラマン増幅器の利得スペクトルのピークが、波長 $\lambda 1$ により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第1ボトムB1を補償するように設定される。さらに、 $\lambda 4$ は、波長 $\lambda 4$ の光によりシリカラマン増幅器の利得スペクトルのピークが、波長 $\lambda 1$ により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第2ボトムB2に位置するように設定される。このように波長 $\lambda 1$ の励起光による第1および第2ボトムB1、B2の利得係数を共に補償することができるので、広い波長域で平坦なスペクトルが得られる。ただし、一般的に、第7実施形態の構成と比較してスペクトル平坦性が劣るため、図14に示されるようにテルライトファイバとシリカファイバとの間に利得等化器15を設けて、平坦性を高めることが好ましい。

【0112】さらに本実施例の構成においても、テルライトファイバが2波長の光で励起されているので、信号光に対して前段に配置されるテルライトファイバの第1

ボトムB1におけるテルライトファイバの最低利得をより大きくすることができる。その結果、より低い雑音指数およびより高い信号光出力が得られる。この効果を実現するための利得係数比の条件は、第8実施形態におけるものと同様である。

【0113】上記のような補償を実現するために、 $\lambda 1$ と $\lambda 2$ との差は、 $\lambda 1 - \lambda 2 = 50 \pm 20 \text{ nm}$ 、すなわち $30 \text{ nm} < \lambda 1 - \lambda 2 < 70 \text{ nm}$ に設定される。これは、第1の励起光の波数と、第2の励起光の波数との差が、 $84 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$ に相当する。また、 $\lambda 1$ と $\lambda 3$ との差は、 $\lambda 3 - \lambda 1 = 25 \pm 15 \text{ nm}$ 、すなわち $10 \text{ nm} < \lambda 1 - \lambda 3 < 40 \text{ nm}$ に設定される。これは、第3の励起光の波数と、第1の励起光の波数との差が、 $42 \sim 166 \text{ cm}^{-1}$ に相当する。さらに、 $\lambda 1$ と $\lambda 4$ との差は、 $\lambda 1 - \lambda 4 = 40 \pm 30 \text{ nm}$ 、すなわち $10 \text{ nm} < \lambda 1 - \lambda 4 < 70 \text{ nm}$ に設定される。これは、第1の励起光の波数と、第4の励起光の波数との差が、 $42 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$ に相当する。

【0114】[実施例10]図14のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を1450nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-2からの励起光の波長を1410nmとし、およびパワーを200mWとした。またLDM-3からの励起光の波長を1475nmとし、およびパワーを150mWとした。LDM-4からの励起光の波長を1400nmとし、およびパワーを150mWとした。テルライトファイバ1の長さは200mであり、およびシリカファイバ11の長さは5kmであった。

【0115】本実施例のラマン増幅器においては、約1500nm〜約1630nmにおいて平坦な利得スペクトル(平坦利得帯域幅130nm)が得られた。

【0116】(第10実施形態)本発明の第10の実施形態は、互いに異なる波長の励起光を発する第1〜第6のレーザ光源と、第1および第2のレーザ光源からの励起光により励起される第1のテルライトファイバと、第3および第4のレーザ光源からの励起光により励起されるシリカファイバと、第5および第6のレーザ光源からの励起光により励起される第2のテルライトファイバとを有する図15に示されるラマン増幅器である。

【0117】図15においては、第1テルライトファイバ1a、合波器2a、利得等化器15a、シリカファイバ11、合波器2b、利得等化器15b、第2テルライトファイバ1b、合波器2cが直列に接続されている。信号光は第1テルライトファイバ1aの側に入射する。第1および第2のレーザ光源5aおよび5bからの励起光( $\lambda 1$ 、 $\lambda 2$ )は、合波器4aにより合波され、そして合波器2aを介して第1テルライトファイバ1aに入射する。第3および第4のレーザ光源5cおよび5dからの励起光( $\lambda 3$ 、 $\lambda 4$ )は、合波器4bにより合波され、そして合波器2bを介してシリカファイバ11に入

射する。第5および第6のレーザ光源5eおよび5fからの励起光( $\lambda 5$ 、 $\lambda 6$ )は、合波器4cにより合波され、そして合波器2cを介して第2テルライトファイバ1bに入射する。

【0118】本実施形態は、第9実施形態の構成よりも増幅器出力を改善するための構成である。図14に示すテルライトファイバを前段に用いる第9実施例のラマン増幅器においては、シリカファイバの利得平坦波長域がテルライトファイバの利得平坦波長域よりも狭いため、シリカファイバの利得平坦波長域の範囲外の波長における増幅器出力が低下する。また、図14とは逆にシリカファイバを前段に用いるラマン増幅器では、シリカファイバの利得平坦波長域の範囲外の波長における雑音指数が高くなる。本実施形態の増幅器は、第2テルライトファイバ1bを用いることにより、これらの欠点を克服する。すなわち、シリカファイバより後の出力段に配置された第2のテルライトファイバのより広い利得平坦波長域により、シリカファイバの利得平坦波長域の範囲外の波長における増幅器出力の低下を防止することができる。また、入力段にも、より広帯域のテルライトファイバを用いるので、雑音指数を低下することができる。

【0119】さらに本実施形態の構成においても、テルライトファイバが2波長の光で励起されているので、第8実施形態同様にテルライトファイバの第1ボトムB1におけるより低い雑音指数およびより高い信号光出力が得られる。この効果を実現するための利得係数比の条件は、第8実施形態におけるものと同様である。

【0120】 $\lambda 1$ 、 $\lambda 2$ 、 $\lambda 3$ および $\lambda 4$ の満たすべき条件は、第9実施形態と同一である。 $\lambda 5$ および $\lambda 6$ は、それぞれ $\lambda 1$ および $\lambda 2$ と同等の設定を用いることができる。すなわち、 $\lambda 6$ は、波長 $\lambda 6$ の光により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第1ピークが、波長 $\lambda 5$ により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第1ボトムに位置するように設定される。このような設定における、 $\lambda 5$ と $\lambda 6$ との差は、 $\lambda 5 - \lambda 6 = 40 \pm 30 \text{ nm}$ 、すなわち $10 \text{ nm} < \lambda 5 - \lambda 6 < 70 \text{ nm}$ に設定される。これは、第5の励起光の波数と第6の励起光の波数との差が、 $125 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$ に相当する。 $\lambda 5$ および $\lambda 6$ を、 $\lambda 1$ および $\lambda 2$ と独立に設定することも可能であるが、好ましくは、 $\lambda 5$ および $\lambda 6$ を、それぞれ $\lambda 1$ および $\lambda 2$ と等しく設定する。図15の構成においては、第1テルライトファイバ用レーザ光源5a、5bとは別に、第2テルライトファイバ用レーザ光源5e、5fを用いているが、図5に示されるように、レーザ光源5aおよび5bからの励起光を合波した複合励起光を分配して、第1および第2テルライトファイバに供給してもよい。

【0121】[実施例11] 図15のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を $1450 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $200 \text{ mW}$ とした。LDM-2から

の励起光の波長を $1410 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $200 \text{ mW}$ とした。またLDM-3からの励起光の波長を $1475 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $150 \text{ mW}$ とした。LDM-4からの励起光の波長を $1400 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $150 \text{ mW}$ とした。LDM-5からの励起光の波長を $1450 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $200 \text{ mW}$ とした。LDM-6からの励起光の波長を $1410 \text{ nm}$ とし、およびパワーを $200 \text{ mW}$ とした。第1テルライトファイバ1aの長さは $200 \text{ m}$ であり、シリカファイバ11の長さは $5 \text{ km}$ であり、第2テルライトファイバ1bの長さは $200 \text{ m}$ であった。

【0122】本実施例のラマン増幅器においては、約 $1500 \text{ nm} \sim 1630 \text{ nm}$ において平坦な利得スペクトル(平坦利得帯域幅 $130 \text{ nm}$ )が得られた。また、本実施例のラマン増幅器の増幅器出力は $20 \text{ dBm}$ であり、実施例10のものの増幅器出力 $18 \text{ dBm}$ より大きかった。

【0123】(第11実施形態) 本発明の第11の実施形態は、互いに異なる励起光波長を有する第1および第2のレーザ光源と、第1のレーザ光源からの励起光により励起されるテルライトファイバと、第2のレーザ光源からの励起光により励起されるエルビウム添加ファイバとを有する、図16に示される光ファイバ増幅器である。

【0124】図16においては、テルライトファイバ1、合波器2、合波器6およびエルビウム添加ファイバ21が直列に接続されている。信号光はテルライトファイバ1の側に入射する(すなわち、テルライトファイバ1は、信号光の入射方向に対して前段にある)。第1のレーザ光源5aからの励起光( $\lambda 1$ )は、合波器2を介してテルライトファイバ1に入射する。第2のレーザ光源5bからの励起光( $\lambda 2$ )は、合波器6を介してエルビウム添加ファイバ21に入射する。

【0125】本実施例において、エルビウム(Er)添加ファイバの利得ピークにより、波長 $\lambda 1$ により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第1ボトムB1を補償するように、 $\lambda 1$ が設定される。波長 $\lambda 1$ の励起光による第1ボトムB1の利得係数を補償することにより、広い波長域で平坦なスペクトルが得られる。

【0126】用いることができるEr添加ファイバの種類は、Er添加テルライトファイバ、Er添加フッ化物ファイバ、Er添加シリカファイバなどである。Er添加ファイバの利得スペクトルは、概略的に $1530 \sim 1570 \text{ nm}$ にピークを有する。Er添加ファイバのための励起光の波長 $\lambda 2$ は、 $1450 \sim 1500 \text{ nm}$ である。好ましくは $\lambda 2$ は $1480 \text{ nm}$ である。また、図16において、Er添加ファイバは前方向励起されているが、後方向励起されていてもよい。

【0127】Er添加ファイバの利得スペクトルピークの幅が狭いため、より広帯域に利得を有するテルライト

10

20

30

40

50

ファイバ1を、信号光の入射方向に対して前段におくことが好ましい。

【0128】一方、テルライトファイバのための励起光の波長 $\lambda_1$ は、波長 $\lambda_1$ により励起されるテルライトラマンファイバの利得スペクトルの第1ボトムを、Er添加ファイバの利得スペクトルピークと適合させるために、1400～1450nmである。 $\lambda_1$ は、好ましくは1430nmである。

【0129】[実施例12] 図16のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を1430nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-2からの励起光の波長を1480nmとし、およびパワーを200mWとした。テルライトファイバ1の長さは200mであった。Er添加ファイバ21の長さは5mであり、Er添加濃度は2000重量ppmであった。

【0130】本実施例のラマン増幅器においては、約1520～1600nmにおいて平坦な利得スペクトル（平坦利得帯域幅80nm）が得られた。

【0131】（第12実施形態）本発明の第12の実施形態は、テルライトファイバと、テルライトファイバを励起する第1のレーザ光源と、テルライトファイバで増幅された信号光を波長選択的に分波する分波器と、該分波器により分波された一方の信号光が入射するツリウム（Tm）添加ファイバと、該ツリウム添加ファイバを励起する第2のレーザ光源と、ツリウム添加ファイバで増幅された信号光と、該分波器により分波された他方の信号光とを合波する合波器とを有する、図17に示される光ファイバ増幅器である。

【0132】図17においては、テルライトファイバ1、合波器2a、および波長選択的分波器14が直列に接続されている。信号光はテルライトファイバ1の側に入射する（すなわち、テルライトファイバ1は、信号光の入射方向に対して前段にある）。第1のレーザ光源5aからの励起光（ $\lambda_1$ ）は、合波器2aを介してテルライトファイバ1に入射する。波長選択的分波器14により、信号光が第1波長域の信号光と第2波長域の信号光とに分波される。第1波長域の信号光は、合波器2bを経由し、ツリウム添加ファイバ31にて増幅されて、合波器4に至る。一方、第2波長域の光は、直接的に合波器4に至る。第2のレーザ光源5bからの励起光（ $\lambda_2$ ）は、合波器2bを介してツリウム添加ファイバ31に入射する。合波器4において第1および第2波長域の信号光が合波されて、増幅器出力光となる。

【0133】本実施形態において、ツリウム（Tm）添加ファイバの利得ピークにより、波長 $\lambda_1$ により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第2ボトムB2を補償するように、 $\lambda_1$ が設定される。波長 $\lambda_1$ の励起光による第2ボトムB2の利得係数を補償することにより、広い波長域で平坦なスペクトルが得られる。

【0134】用いることができるTm添加ファイバの種類は、Tm添加テルライトファイバ、Tm添加フッ化物ファイバ、Tm添加シリカファイバなどである。Tm添加ファイバ31の励起波長 $\lambda_2$ は1400nmである。Tm添加フッ化物ファイバの利得波長域は約1460～1510nmであり、1510nmより長波長側では、基底準位吸収により損失が生じる。図17において、Tm添加ファイバ31は、前方向励起されているが、後方向励起されてもよい。

【0135】このTm添加ファイバの吸収による損失を防止するために、波長選択的分波器16を用いて、第1波長域（約1460～1510nm）の信号光と第2波長域（約1515～1620nm）の信号光とに分離する。そして、第1波長域の信号光のみをツリウム添加ファイバ31にて増幅し、合波器4へと伝搬させる。一方、第2波長域の信号光の通過レートに対して、分波器16と合波器4とは損失の無視できる光ファイバで結合されている。この場合、1510～1515nmの波長域は分波器および合波器のデッドバンドである。

【0136】前述のTm添加ファイバの利得域を第2ボトムに合わせるための、テルライトファイバ1の励起波長 $\lambda_1$ は1310～1480nmであり、好ましくは1450nmである。

【0137】[実施例13] 図17のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を1450nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-2からの励起光の波長を1400nmとし、およびパワーを200mWとした。テルライトファイバ1の長さは200mであった。Tm添加ファイバ31の長さは5mであり、Tm添加濃度は6000重量ppmであった。

【0138】本実施例のラマン増幅器においては、1510～1515nmのデッドバンドを除く約1460～1620nmの波長域において平坦な利得スペクトル（平坦利得帯域幅160nm）が得られた。

【0139】（第13実施形態）本発明の第13の実施形態は、テルライトファイバと、テルライトファイバを励起する第1のレーザ光源と、テルライトファイバで増幅された信号光を波長選択的に分波する分波器と、該分波器により分波された一方の信号光が入射するツリウム（Tm）添加ファイバと、該ツリウム添加ファイバを励起する第2のレーザ光源と、該分波器により分波された他方の信号光が入射するシリカファイバと、該シリカファイバを励起する第3のレーザ光源と、ツリウム添加ファイバで増幅された信号光と、シリカファイバで増幅された信号光とを合波する合波器とを有する、図18に示される光ファイバ増幅器である。

【0140】図18においては、テルライトファイバ1、合波器2a、および波長選択的分波器14が直列に接続されている。信号光はテルライトファイバ1の側に入射する（すなわち、テルライトファイバ1は、信号光

10

20

30

40

50

の入射方向に対して前段にある)。第1のレーザ光源5aからの励起光( $\lambda 1$ )は、合波器2aを介してテルライトファイバ1に入射する。波長選択的分波器14により、信号光が第1波長域の信号光と第2波長域の信号光とに分波される。第1波長域の信号光は、合波器2bを経由し、ツリウム添加ファイバ31にて増幅されて、合波器4に至る。一方、第2波長域の信号光は、シリカファイバ11で増幅され、合波器2cを通過して合波器4に至る。第3のレーザ光源5cからの励起光は、合波器2cを介してシリカファイバ11に入射する。合波器4において第1および第2波長域の信号光が合波されて、増幅器出力光となる。なお、本実施形態においても、1510~1515nmの波長域は分波器および合波器のデッドバンドである。

【0141】本実施形態において、ツリウム(Tm)添加ファイバの利得ピークにより、波長 $\lambda 1$ により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第2ボトムB2を補償するように、 $\lambda 1$ が設定される。すなわち、Tm添加ファイバ31により、波長 $\lambda 1$ の励起光による第1ボトムB2を平坦化する。前述のTm添加ファイバの利得域を第2ボトムに合わせるための、テルライトファイバ1の励起波長 $\lambda 1$ は1310~1480nmであり、好ましくは1450nmである。図18において、Tm添加ファイバ31は、前方向励起されているが、後方向励起されてもよい。

【0142】一方、前記第3のレーザ光源の励起光波長 $\lambda 3$ は、波長 $\lambda 1$ により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルの第1ボトムB1を補償するように、設定される。波長 $\lambda 3$ は、1380~1550nmの範囲内、好ましくは1480nmである。図18において、シリカファイバ11は、後方向励起されているが、前方向励起されてもよい。

【0143】上記のように、波長 $\lambda 1$ により励起されるテルライトラマン増幅器の利得スペクトルにおいて、その第1ボトムをシリカファイバの利得ピークにより補償し、かつ第2ボトムをTm添加ファイバの利得ピークにより補償することによって、より広帯域で平坦な利得スペクトルを得ることができる。

【0144】[実施例14] 図18のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を1450nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-2からの励起光の波長を1400nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-3からの励起光の波長を1480nmとし、およびパワーを200mWとした。テルライトファイバ1の長さは200mであり、シリカファイバの長さは5kmであった。Tm添加ファイバ31の長さは5mであり、Tm添加濃度は6000重量ppmであった。

【0145】本実施例のラマン増幅器においては、1510~1515nmのデッドバンドを除く約1460~

1620nmの波長域において平坦な利得スペクトル(平坦利得帯域幅160nm)が得られた。

【0146】(第14実施形態) 本発明の第14実施例のラマン増幅器は、第1、第2および第3のレーザ光源と、第1のレーザ光源からの励起光により励起されるテルライトファイバと、第2のレーザ光源からの励起光により励起される希土類添加ファイバ(ツリウム(Tm)添加ファイバあるいはエルビウム添加ファイバなど)と、第3のレーザ光源により励起されるシリカファイバとを有し、テルライトファイバ、希土類添加ファイバ、およびシリカファイバが直列に接続されている、図19に示される光ファイバ増幅器である。

【0147】図19においては、テルライトファイバ1、合波器2a、合波器2b、Tm添加ファイバ31、シリカファイバ11および合波器2cが直列に接続されている。信号光はテルライトファイバ1の側に入射する(すなわち、テルライトファイバ1は、信号光の入射方向に対して前段にある)。第1のレーザ光源5aからの励起光( $\lambda 1$ )は、合波器2aを介してテルライトファイバ1に入射する。第2のレーザ光源5bからの励起光( $\lambda 2$ )は、合波器2bを介してTm添加ファイバ31に入射する。第3のレーザ光源5cからの励起光は、合波器2cを介してシリカファイバ11に入射する。

【0148】第2のレーザ光源からの励起光の波長 $\lambda 2$ は、使用される希土類に依存する。本実施形態において用いることができる希土類は、ツリウムおよびエルビウムを含み、好ましくはツリウムである。ツリウムを用いる場合、その励起波長は1400nmであり、および利得領域は1460~1510nmである。希土類添加ファイバの利得領域幅は約50nmであり、利得領域より長波長の領域では、基底準位吸収(ツリウムの場合)または上位準位吸収(エルビウムの場合)が生じる。そこで、第1のレーザ光源からの励起光の波長 $\lambda 1$ を、希土類添加ファイバの利得領域が、 $\lambda 1$ の光によるテルライトファイバの利得スペクトルの第1あるいは第2ボトムに重なるように設定する。この設定により、希土類による利得領域より長波長の領域の信号を、入力段であるテルライトファイバによりあらかじめ増幅して、増幅器全体の雑音指数の低下を防止することができる。

【0149】さらに、希土類添加ファイバを出射する信号光を、出力段のシリカファイバにて増幅する。シリカファイバの励起光の波長 $\lambda 3$ は、 $\lambda 1$ の励起光による利得スペクトルの第1ボトムあるいは第2ボトムを補償するように設定される。

【0150】本実施形態においては、希土類添加ファイバがテルライトファイバの第1ボトムを補償し、およびシリカファイバが第2ボトムを補償する設定にすることもできるし、あるいは、希土類添加ファイバがテルライトファイバの第2ボトムを補償し、およびシリカファイバが第1ボトムを補償する設定にすることもできる。本

10

20

30

40

50

実施形態において、希土類として、ツリウムを用いる場合、テルライトファイバの励起光の波長 $\lambda_1$ を、1310~1480nm、好ましくは1450nmに設定することができ、およびシリカファイバの励起光の波長 $\lambda_3$ を1380~1550nm、好ましくは1480nmに設定することができる。

【0151】本実施形態においてより好ましくは、希土類添加ファイバがテルライトファイバの第1ボトムを補償し、およびシリカファイバが第2ボトムを補償する。具体的には、 $\lambda_1=1450\text{nm}$ 、 $\lambda_3=1480\text{nm}$  10 の設定を用いる。

【0152】本実施例の1つの利点は、デッドバンドのないことである。すなわち希土類添加ファイバとシリカファイバとを並列接続する第13実施形態においては、並列接続に用いる波長選択的分波器によるデッドバンドのために、利得スペクトルの欠落が生じる。これに対して、本実施例においては、すべてのファイバが直列に接続され、分波器を用いる必要がないので、利得スペクトルの欠落（システム全体としてのデッドバンド）の発生を防止することができる。

【0153】本実施例の別の利点は、ツリウム添加ファイバとシリカファイバとの利得帯域合成が高効率であることである。第13実施形態においては、並列接続された2つのファイバの出力光を合波する並列合成を行うために、利得帯域の合成の効率は低いものであった。しかし、本実施例においては、両ファイバを直列に接続する直列合成を行うため、利得帯域の合成の効率を高くすることが可能である。

【0154】[実施例15] 図19のラマン増幅器において、LDM-1からの励起光の波長を1450nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-2からの励起光の波長を1400nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-3からの励起光の波長を1480nmとし、およびパワーを200mWとした。テルライトファイバ1の長さは200mであり、シリカファイバの長さは5kmであった。Tm添加ファイバ31の長さは5mであり、Tm添加濃度は6000重量ppmであった。

【0155】本実施例のラマン増幅器においては、デッドバンドをもたない、約1460~1620nmの波長域において平坦な利得スペクトル（平坦利得帯域幅160nm）が得られた。

【0156】（第15実施形態）本発明の第15実施形態のラマン増幅器は、レーザ光源と、該レーザ光源により励起される希土類添加ファイバ（ツリウム（Tm）添加ファイバあるいはエルビウム添加ファイバなど）とを有する、図20に示される光ファイバ増幅器である。

【0157】図20においては、エルビウム添加テルライトファイバ41と、合波器2とが直列に接続されている。レーザ光源5からの励起光（ $\lambda$ ）は、合波器2を介 50

してエルビウム添加テルライトファイバ41に入射する。エルビウム添加テルライトファイバ41は、誘導ラマン増幅の利得媒質およびエルビウムイオンによる増幅の利得媒質の両方として機能する。

【0158】本実施形態においては、波長 $\lambda$ によって励起されるテルライトファイバのラマン利得スペクトルの第1ボトムを、波長 $\lambda$ により励起される添加物のErの利得ピークにより補償する。波長 $\lambda$ は、1410~1440nm、好ましくは1430nmである。Erイオンは約1430nmの励起光で励起可能であり、その利得スペクトルは第11実施形態のものとは若干異なるが、依然として概略的に1530~1570nmにピークを有する。

【0159】本実施形態において、誘導ラマン増幅による利得は、励起光の出力パワーおよびテルライトファイバ41の長さに比例し、一方、Erによる増幅の利得は、励起光の出力パワーおよびErの添加濃度とファイバ41の長さとの積に比例する。したがって、所望されるラマン増幅利得を得るために必要な励起光パワーを実用的な範囲内にするためには、エルビウムの添加を1000重量ppm以下、望ましくは250重量ppm以下とすることが望ましい。たとえば、Erの増幅利得をテルライトファイバのラマン増幅利得と同等のものにして、利得スペクトルの平坦化に適合させるためには、添加濃度1000重量ppmのファイバを用いる際に望ましいファイバ長は50mであり、添加濃度250重量ppmのファイバを用いる際は、250mである。すなわち、後者の場合のラマン増幅効率は、前者の約5倍である。

【0160】[実施例16] 図19のラマン増幅器において、LDMからの励起光の波長を1430nmとし、およびパワーを200mWとした。エルビウム添加テルライトファイバ41の長さは250mであり、Er添加濃度は250重量ppmであった。

【0161】本実施例のラマン増幅器においては、約1520~1600nmの波長域において平坦な利得スペクトル（平坦利得帯域幅80nm）が得られた。

【0162】（第16実施形態）本発明の第16実施形態のラマン増幅器は、第1および第2のレーザ光源と、該第1および第2のレーザ光源により励起される希土類添加ファイバ（ツリウム（Tm）添加ファイバあるいはエルビウム添加ファイバなど）とを有する、図21に示される光ファイバ増幅器である。本実施形態において用いることができる希土類は、エルビウムおよびツリウムを含み、好ましくはエルビウムである。希土類添加テルライトファイバ41は、誘導ラマン増幅の利得媒質および希土類による増幅の利得媒質の両方として機能する。

【0163】図21においては、エルビウム添加テルライトファイバ41と、合波器2とが直列に接続されている。第1および第2のレーザ光源5a、5bからの励起



光( $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ )は、合波器4によって合波され、そして合波器2を介してエルビウム添加テルライトファイバ41に入射する。

【0164】本実施形態においては、波長 $\lambda_1$ によって励起されるテルライトファイバの利得スペクトルの第1ボトムを、波長 $\lambda_2$ により励起される添加物のErの利得ピークにより補償する。波長 $\lambda_1$ は、1410~1440nm、好ましくは1430nmである。波長 $\lambda_2$ は、1450~1500nm、好ましくは1480nmである。

【0165】本実施形態においても、第15実施形態に記載の理由により、エルビウムの添加を1000重量ppm以下、望ましくは250重量ppm以下とすることが望ましい。

【0166】(第17実施形態)本発明の第17の実施形態は、(a)第1および第2のレーザ光源、および前記第1のレーザ光源からの励起光により励起されるテルライトファイバを有する中継器と、(b)前記第2のレーザ光源からの励起光により励起されるシリカファイバからなる1区間の伝送線路とを含む伝送線路区間を、少なくとも1区間以上有する、図22に示される光通信システムである。

【0167】図22においては、伝送経路をなすシリカファイバ13aと、合波器2a、テルライトファイバ1、合波器2bが直列に接続され、それがさらに次位の伝送経路をなすシリカファイバ13bに接続されている。第1のレーザ光源5aからの励起光( $\lambda_1$ )は、合波器2aを介してテルライトファイバ1に入射する。第2のレーザ光源5bからの励起光( $\lambda_2$ )は、合波器2bを介してシリカファイバ13aに入射する。中継器14は、第1および第2のレーザ光源5aおよび5b、2つの合波器2aおよび2b、ならびにテルライトファイバ1を含む。1つの中継器14と1つの伝送線路(シリカファイバ13a)とにより、1つの伝送線路区間が形成される。

【0168】本実施形態においては、第1のレーザ光源からの励起光( $\lambda_1$ )によって得られるテルライトファイバの利得係数スペクトルの第1ボトムが、第2のレーザ光源からの励起光( $\lambda_2$ )によって得られるシリカファイバの利得係数スペクトルのピークに重なるように設定する。 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ の差が、 $\lambda_2 - \lambda_1 = 25 \pm 15$ nm、すなわち、 $40\text{nm} > \lambda_2 - \lambda_1 > 10\text{nm}$ であるようにする。 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ の差 $\lambda_2 - \lambda_1$ は、より好ましくは15nm~35nm、および最も好ましくは20nm~30nmである。また、前記波長差10nm~40nmに対応した2つの励起光の波数差は、約 $42 \sim 166\text{cm}^{-1}$ である。 $\lambda_1$ および $\lambda_2$ を上記のように設定した場合、シリカファイバの利得領域においては、伝送線路中で、分布増幅による信号対雑音比の向上(雑音指数の低下)が実現される。テルライトファイバ

1の利得スペクトルの窪みをシリカファイバの利得ピークが補償するため、広い波長域で平坦なスペクトルが得られる。したがって、テルライトファイバ1における利得スペクトル窪み付近の波長における雑音指数劣化の抑圧が容易かつ顕著に行なえる。また、シリカファイバの分布利得が大きい波長域で特に大きな光信号対雑音比が得られた場合には、その波長域を伝送線路のゼロ分散波長に設定できるという利点がある。

【0169】伝送線路であるシリカファイバ13a、13bは、一般に低損失係数を有する分散補償ファイバ(DCF)、分散シフトファイバ(DSF)、あるいは1.3 $\mu\text{m}$ シングルモードファイバなどである。伝送線路中でラマン増幅を分布的に行うため、分布増幅による信号対雑音比の向上(雑音指数の低下)が、分布利得が大きい波長域で生じる。ここで、1.3 $\mu\text{m}$ シングルモードファイバとは、ゼロ分散波長が1.3 $\mu\text{m}$ に存在するファイバである。分散シフトファイバとは、ファイバの構造分散を調整して、ゼロ分散波長を1.3 $\mu\text{m}$ から約1.55 $\mu\text{m}$ にシフトさせたファイバである。したがって、特に分散シフトファイバは、基幹系の長距離伝送システムにおいて重要である。1.55 $\mu\text{m}$ 近傍の波長を有する信号光を用いた高速伝送に適したファイバである。

【0170】[実施例17]図22の光通信システムにおいて、LDM-1からの励起光の波長を1450nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-2からの励起光の波長を1475nmとし、およびパワーを200mWとした。テルライトファイバ1の長さは200mであり、伝送経路をなすシリカファイバ13aの長さは40kmであった。

【0171】本実施例の光通信システムにおいては、約1550~1630nmの波長域において平坦な利得スペクトル(平坦利得帯域幅80nm)が得られた。

【0172】[実施例18]図22の光通信システムにおいて、LDM-1からの励起光の波長を1420nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-2からの励起光の波長を1445nmとし、およびパワーを200mWとした。テルライトファイバ1の長さは200mであり、伝送経路をなすシリカファイバ13aとしてDSFを用い、その長さは80kmであった。

【0173】本実施例の光通信システムにおいては、約1510~1590nmの波長域において平坦な利得スペクトル(平坦利得帯域幅80nm)が得られた。さらに、本実施例においては、ゼロ分散波長を1550nmに設定することができた。1550nm付近の領域において高い光信号対雑音比が得られ、非線形効果による伝送品質の劣化の抑圧を行うことができた。

【0174】(第18実施形態)本発明の第18の実施形態は、(a)第1~第3、第5および第6のレーザ光源と、前記第1および第2のレーザ光源からの励起光に

より励起される第1のテルライトファイバと、前記第3のレーザ光源からの励起光により励起される第1のシリカファイバと、前記第5および第6のレーザ光源からの励起光により励起される第2のテルライトファイバとを有する中継器と；(b)第4のレーザ光源と、前記第4のレーザ光源からの励起光により励起される第2のシリカファイバとを有する1区間の伝送線路とを含む伝送線路区間を、少なくとも1区間以上有する、図23に示される光通信システムである。

【0175】図23においては、図15に示される第10実施形態のラマン増幅器を中継器14として用いている。ただし、本実施例においては、シリカファイバ11が波長 $\lambda_3$ の単一励起光によって励起されている点が異なる。伝送線路をなすシリカファイバ13と、合波器2d、第1のテルライトファイバ1a、合波器2a、シリカファイバ11、合波器2b、第2のテルライトファイバ1bおよび合波器2cが直列に接続されている。第1および第2のレーザ光源5a、5bからの励起光( $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ )は、合波器4aを介して第1のテルライトファイバ1aに入射する。第3のレーザ光源5cからの励起光( $\lambda_3$ )は、合波器2bを介してシリカファイバ11に入射する。第5および第6のレーザ光源5e、5fからの励起光( $\lambda_5$ 、 $\lambda_6$ )は、合波器4bを介して第2のテルライトファイバ1bに入射する。中継器14は、シリカファイバ13および合波器2dを除く上記の要素を含む。第4のレーザ光源5dからの励起光( $\lambda_4$ )は、合波器2dを介して1区間の伝送線路をなすシリカファイバ13に入射する。1つの中継器14と1つの伝送線路(シリカファイバ13)とにより、1つの伝送線路区間が形成される。信号光は、シリカファイバ13から中継器へと入射する。

【0176】第10実施例のラマン増幅器においては、広帯域のテルライトファイバを入力段に用いているとはいえ、第1のテルライトファイバ1aの利得スペクトルの第1ボトムおよび第2ボトムは、シリカファイバ11の利得ピークにより完全には平坦化されていない。したがって、第1ボトムまたは第2ボトムのいずれかあるいはその両方において、雑音指数が第1および第2ピークの波長における雑音指数よりも大きくなる。本実施例の光通信システムにおいては、伝送線路であるシリカファイバ13中で分布ラマン増幅を行うことによって、第1ボトムおよび第2ボトムの実効的雑音指数を低下させることが可能である。

【0177】上記のように、伝送線路であるシリカファイバ13、第1テルライトファイバ1aおよびシリカファイバ11により、広い平坦利得帯域と低い雑音指数を有する利得スペクトルを得ることができる。さらに、本実施形態においては、出力段として広帯域の第2のテルライトファイバ1bを用いて、中継器14(ひいては光通信システム)の出力パワーを増大させることができ

る。ここで、シリカファイバ11と第2のテルライトファイバ1bとの間に利得等化器15を設置することが、利得スペクトルの平坦化および増幅器高出力化の観点から好ましい。なお、シリカファイバ11以前の段階によって、所望される特性(広い平坦利得領域、高いパワーおよび低い雑音指数)が得られるならば、第2のテルライトファイバ1bを省略することも可能である。

【0178】 $\lambda_1 \sim \lambda_6$ の満たすべき条件は、第10実施形態と同一である。

【0179】すなわち、 $\lambda_1$ と $\lambda_2$ との差は、 $\lambda_1 - \lambda_2 = 50 \pm 20 \text{ nm}$ 、すなわち  $30 \text{ nm} < \lambda_1 - \lambda_2 < 70 \text{ nm}$  に設定される。これは、本実施例において用いる波長帯において、第1の励起光の波数と、第2の励起光の波数との差が、 $125 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$  に相当する。また、 $\lambda_1$ と $\lambda_3$ との差は、 $\lambda_3 - \lambda_1 = 25 \pm 15 \text{ nm}$ 、すなわち  $10 \text{ nm} < \lambda_3 - \lambda_1 < 40 \text{ nm}$  に設定される。これは、本実施例において用いる波長帯において、第3の励起光の波数と、第1の励起光の波数との差が、 $42 \sim 166 \text{ cm}^{-1}$  に相当する。さらに、 $\lambda_1$ と $\lambda_4$ との差は、 $\lambda_1 - \lambda_4 = 40 \pm 30 \text{ nm}$ 、すなわち  $10 \text{ nm} < \lambda_1 - \lambda_4 < 70 \text{ nm}$  に設定される。これは、第1の励起光の波数と、第4の励起光の波数との差が、 $42 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$  に相当する。また、 $\lambda_5$ および $\lambda_6$ は、それぞれ $\lambda_1$ および $\lambda_2$ と同一である。

【0180】上記の設定では、波長 $\lambda_3$ の光により励起されるシリカファイバ11の利得ピークは、波長 $\lambda_1$ の光により励起されるテルライトファイバの第1ボトムを補償する。一方、波長 $\lambda_4$ の光により励起されるシリカファイバ13の利得ピークは、波長 $\lambda_1$ の光により励起されるテルライトファイバの第2ボトムを補償する。波長 $\lambda_3$ と波長 $\lambda_4$ の条件を入れ替えて、波長 $\lambda_3$ による利得ピークにより第2ボトムを、および波長 $\lambda_4$ による利得ピークにより第1ボトムを補償してもよい。すなわち、 $\lambda_1$ と $\lambda_4$ との差を、 $\lambda_4 - \lambda_1 = 25 \pm 15 \text{ nm}$ 、すなわち  $10 \text{ nm} < \lambda_4 - \lambda_1 < 40 \text{ nm}$  に設定し、および $\lambda_1$ と $\lambda_3$ との差は、 $\lambda_1 - \lambda_3 = 40 \pm 30 \text{ nm}$ 、すなわち  $10 \text{ nm} < \lambda_1 - \lambda_3 < 70 \text{ nm}$  に設定してもよい。言い換えると、第4の励起光の波数と第1の励起光の波数との差が、 $42 \sim 166 \text{ cm}^{-1}$  に相当し、および第1の励起光の波数と第3の励起光の波数との差が、 $42 \sim 290 \text{ cm}^{-1}$  に相当してもよい。

【0181】また、図23に示した構成では、シリカファイバ13を単一波長励起しているが、異なる波長の2つの光を用いて励起してもよい。その場合において、それら2つの光の波長は、上記 $\lambda_3$ および $\lambda_4$ の条件を満たす必要がある。2つの励起光を用いることにより、テルライトファイバの第1および第2ボトムの両方を、シリカファイバ13における分布利得により補償することが可能となり、さらなる雑音指数の低下が可能となる。

また、中継器内のシリカファイバ11aについても、同

様の条件により2波長励起を実施してもよい。

【0182】さらに、図23の構成においては、第1テルライトファイバ用レーザ光源5a、5bとは別に、第2テルライトファイバ用レーザ光源5e、5fを用いているが、図5に示されるように、レーザ光源5aおよび5bからの励起光を合波した複合励起光を分配して、第1および第2テルライトファイバに供給してもよい。

【0183】〔実施例19〕図23の光通信システムにおいて、LDM-1およびLDM-5からの励起光の波長を1450nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-2およびLDM-6からの励起光の波長を1410nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-3からの励起光の波長を1475nmとし、およびパワーを200mWとした。LDM-4からの励起光の波長を1400nmとし、およびパワーを200mWとした。テルライトファイバ1aの長さは200mであり、およびテルライトファイバ1bの長さは180mであった。シリカファイバ11の長さは5kmであった。伝送経路をなすシリカファイバ13としてDSFを用い、その長さは80kmであった。

【0184】本実施例の光通信システムにおいては、約1500~1630nmの波長域において平坦な利得スペクトル（平坦利得帯域幅130nm）が得られた。さらに、本実施例においては、実施例11（図15）よりも低い実効的雑音指数を実現することができた。実施例11における雑音指数の最大値は9dBであったが、本実施例における実効的雑音指数の最大値は6dBに向上した。

【0185】

【発明の効果】以上説明したように、本発明は、光信号のラマン増幅による利得スペクトルが励起光および増幅媒体に依存することに着目して、なされたものである。

【0186】すなわち、本発明の光ファイバ増幅器は、テルライトファイバを用いることを基本とするラマンファイバ増幅器であり、1）テルライトファイバを2波長で励起すること、2）テルライトファイバとシリカファイバをそれぞれ異なる波長で励起すること、3）Erを低濃度に添加したテルライトファイバを1つ又は2つの波長で励起すること、および4）テルライトファイバとTm添加ファイバを異なる波長で励起することを適宜組み合わせ、平坦利得帯域の拡大、雑音指数の低下、および増幅器の出力増大などの効果を提供するものである。また、前述の効果を少数の励起光源を用いて達成することが可能であるので、増幅器の低コスト化にも有利である。

【0187】さらに、本発明の光通信システムは、テルライトファイバを用いた中継器および分布増幅を行うシリカファイバ伝送線路を用いるシステムであり、上記の手段を適宜組み合わせ、少数の励起光源を用いて、平坦利得帯域の拡大、雑音指数の低下、および増幅器の出

力増大などの効果を提供するものである。

【0188】上記のように、本発明によって、従来技術のラマン増幅器およびラマン増幅を用いる光通信システムで問題であった利得帯域の制限および多数の励起光源を用いる必要性という欠点を解決することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】従来技術のシリカラマン増幅器の構成および利得係数スペクトルを示す図であり、(a)はシリカラマン増幅器の構成を、および(b)はシリカラマン増幅器の利得係数スペクトルを示す図である。

【図2】単一波長励起を用いるテルライトラマン増幅器の利得係数スペクトルを示す図である。

【図3】本発明の第1実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図4】本発明の第1実施形態のテルライトラマン増幅器の利得係数スペクトルを示すグラフであり、(a)は実施例1の利得(dB単位の相対値)スペクトルを、(b)は実施例2の利得(dB単位の相対値)スペクトルを示すグラフである。

【図5】本発明の第2実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図6】本発明の第3実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図7】本発明の第4実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図8】本発明の第5実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図9】本発明の第6実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図10】本発明の第7実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図11】本発明の第7実施形態のラマン増幅器の利得スペクトルを示すグラフであり、(a)は比較のための実施例4の利得(dB単位の相対値)スペクトルを、(b)は実施例8の利得(dB単位の相対値)スペクトルを示すグラフである。

【図12】本発明の第8実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図13】単一波長励起および2波長励起されたテルライトファイバのラマン利得を示すグラフである。

【図14】本発明の第9実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図15】本発明の第10実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図16】本発明の第11実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図17】本発明の第12実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図18】本発明の第13実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図19】本発明の第14実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図20】本発明の第15実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図21】本発明の第16実施形態のラマン増幅器の構成を示す図である。

【図22】本発明の第17実施形態の光通信システムの構成を示す図である。

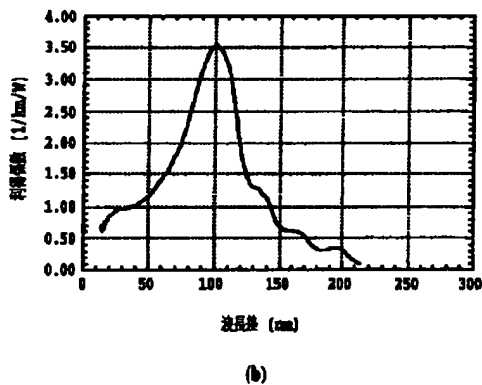
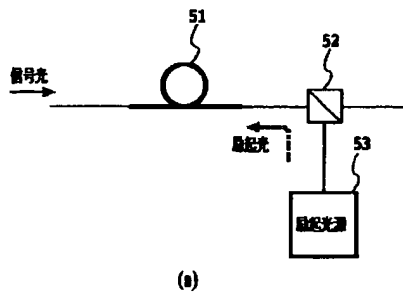
【図23】本発明の第18実施形態の光通信システムの構成を示す図である。

【符号の説明】

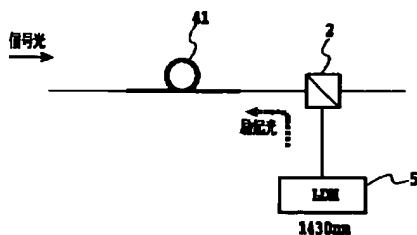
- 1 テルライトファイバ  
2 合波器

- 3 光源装置  
4 合波器  
5 レーザ光源  
11 シリカファイバ  
12 反射素子  
13 シリカファイバ  
14 中継器  
15 利得等化器  
16 分波器  
10 21 エルビウム添加ファイバ  
31 ツリウム添加ファイバ  
41 希土類添加テルライトファイバ

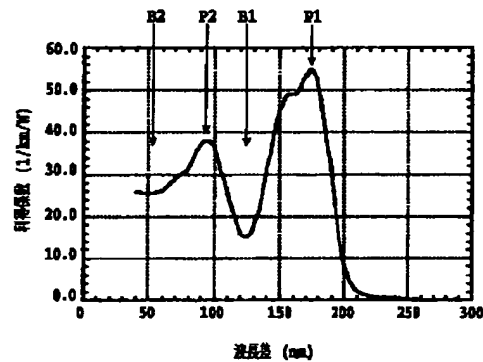
【図1】



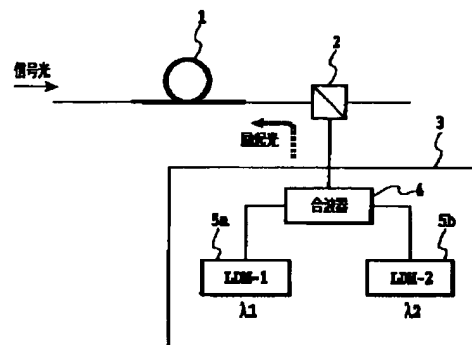
【図20】



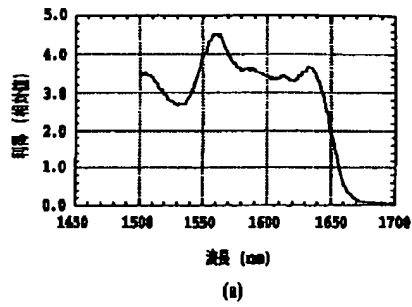
【図2】



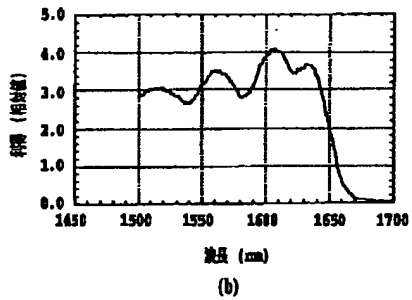
【図3】



【図4】

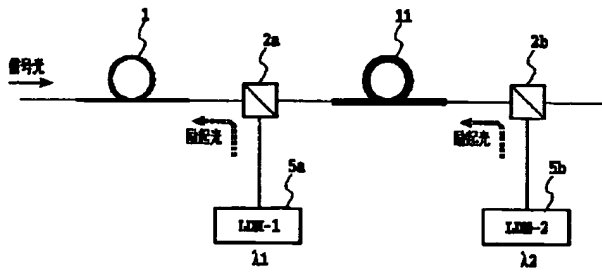


(a)

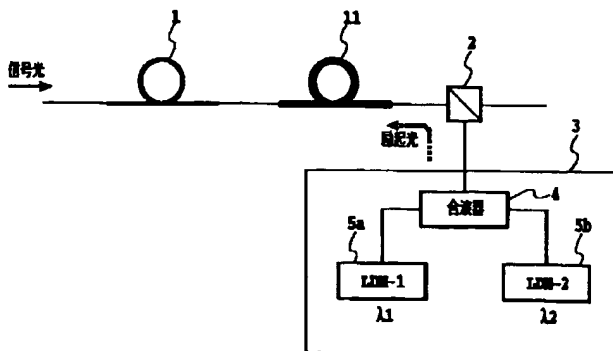


(b)

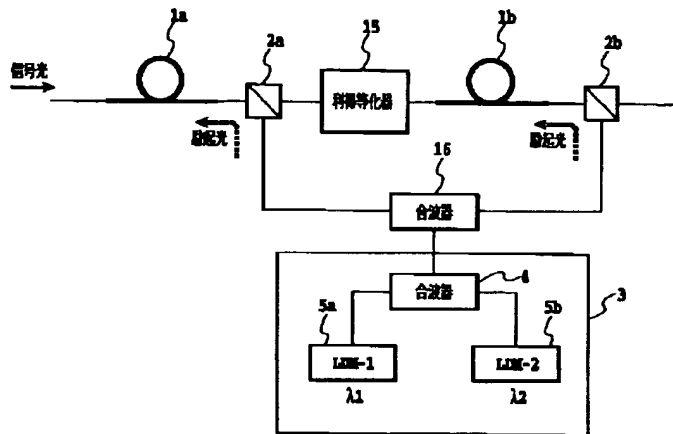
【図6】



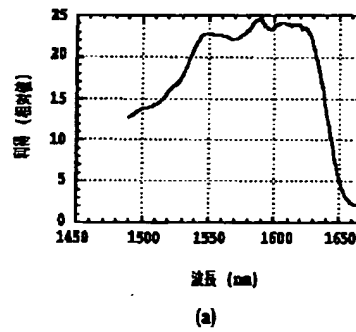
【図7】



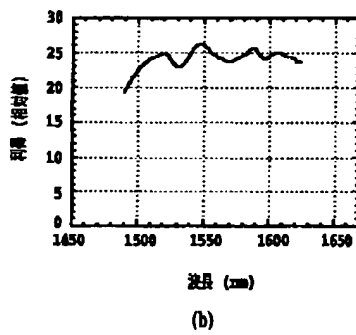
【図5】



【図11】

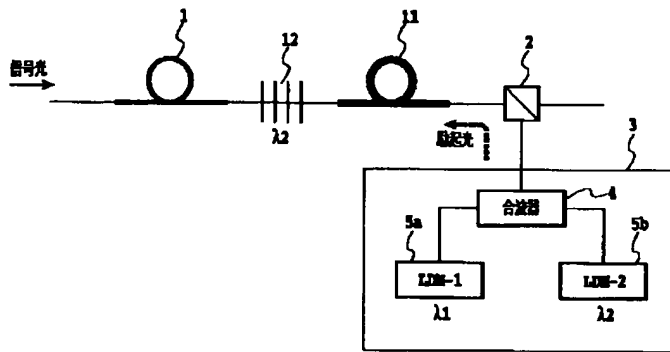


(a)

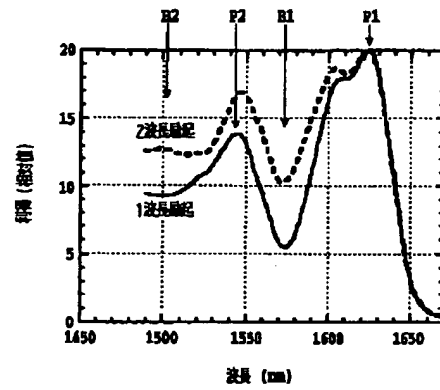


(b)

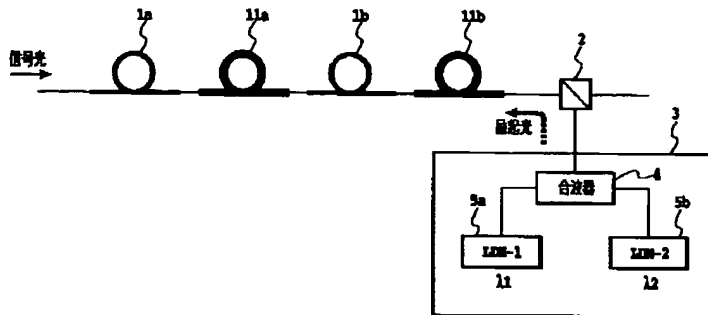
【図8】



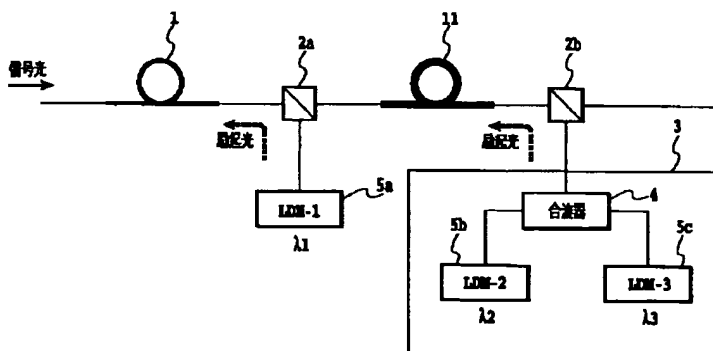
【図13】



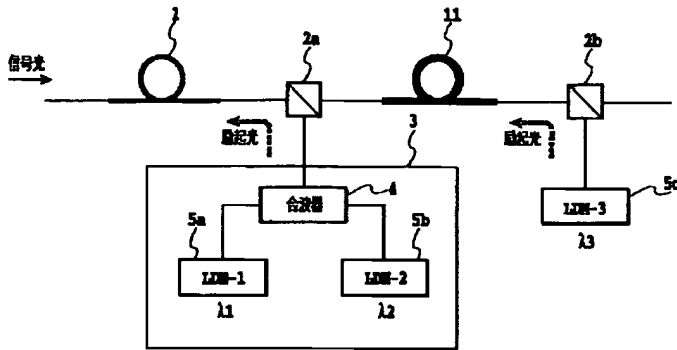
【図9】



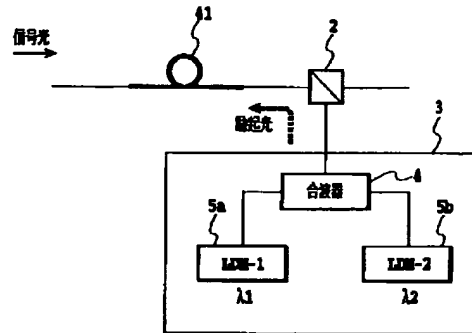
【図10】



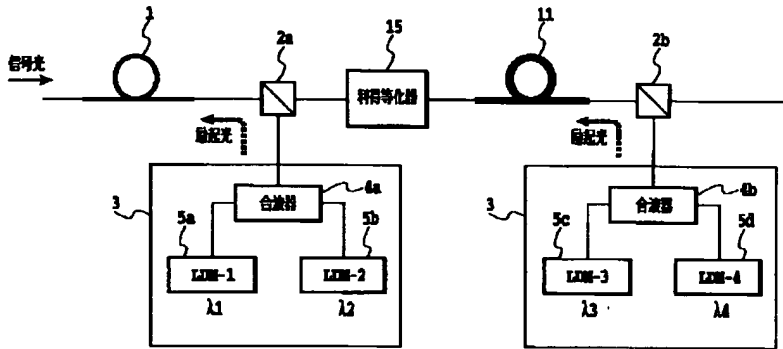
【図12】



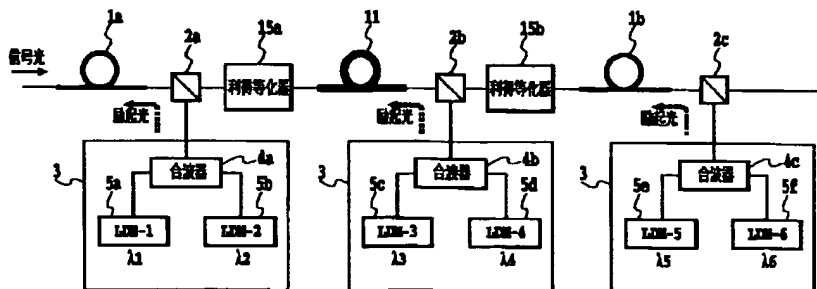
【図21】



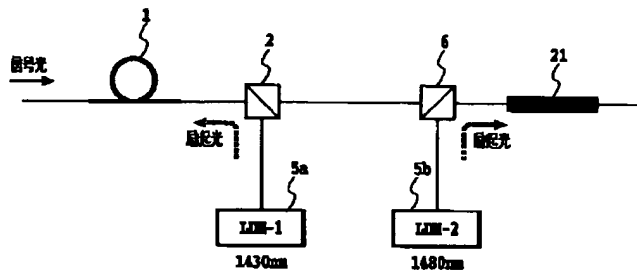
【図14】



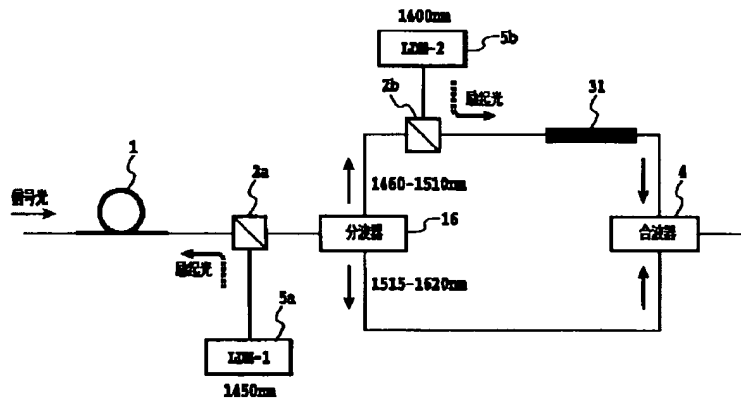
【図15】



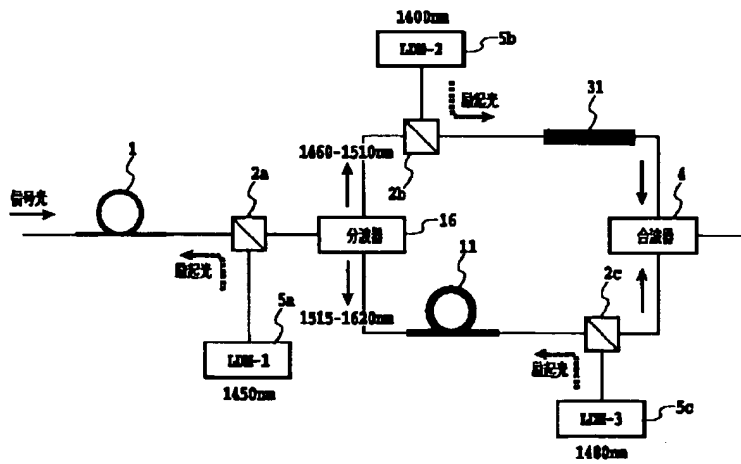
【図16】



【図17】

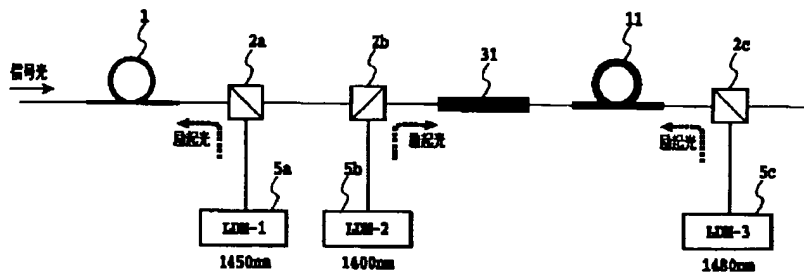


【図18】

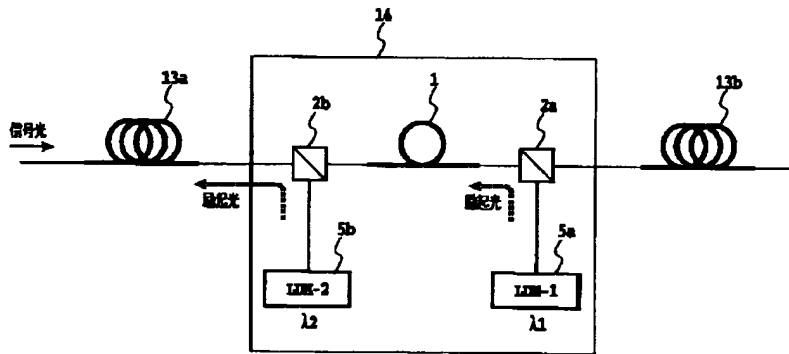




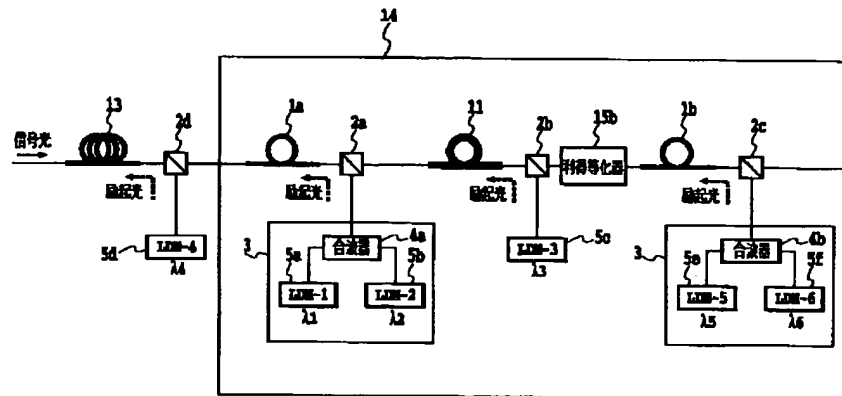
【図19】



【図22】



【図23】



フロントページの続き

(51)Int. Cl. 7

H01S 3/30

H04B 10/16

10/17

識別記号

FI

H01S 3/30

H04B 9/00

テマコード(参考)

Z

J

(72)発明者 清水 誠

東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日  
本電信電話株式会社内

Fターム(参考) 2K002 AA02 AB30 BA01 CA15 CA30  
DA10 GA10 HA23  
5F072 AB07 AB09 AB20 AK06 JJ20  
PP07 QQ07 RR01 YY17  
5K002 AA06 BA05 BA13 BA21 CA03  
CA08 CA13 FA02